

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo comparativo das metodologias de classificação energética de edifícios de escritórios no âmbito da revisão regulamentar (RSECE)

Ana Filipa Parente Gouveia

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo comparativo das metodologias de classificação energética em edifícios de escritórios no âmbito da revisão regulamentar (RSECE)

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de:

Marta João Nunes Oliveira Panão (FCUL)

Álvaro Ferreira Ramalho (LNEG)

2012

Abstract

Economic development in the last decades was characterized by oil-based energy production. The finite nature of the natural resources and the environmental impact of his production and consumption alerted the world for the necessity of change of these premises .One of the sectors that contribute with a high percentage of the global consumption of energy in the European Union is the buildings sector (40 %). So, in 2010, the 2002/91/CE Directive was reformed, creating the 2010/31/EU Directive, what was promoting the improvement of the energetic performance of the buildings in the community and which introduces new concepts: nearly zero-energy building (nZEB), minimum energy performance requirements and the cost optimal. This new directive reinforces the need of energy certification, in order to promote the more energy efficient buildings.

Energy performance certification considers two base methods: asset rating (nominal conditions) and operational rating (operating method). This dissertation goal was a comparative study of the different methodologies of energy performance classification for office buildings in the regulation revision context (*RSECE*). This study was carried out for two office buildings with different constructive features and located in different regions.

Another of the introduced concepts in the new Directive is it of the optimized profit level. In this dissertation, constructive elements' influence in energy consumption of an office building located in the region of the Fundão was analyzed. Considering an exact analysis of the building's energy performance for the different constructive solutions, an economical study was elaborated connecting energy consumption with the cost of the constructive adopted solutions.

This study showed that, in both cases, the proposed energy classification methodologies do not change the buildings' energy performance classification, in comparison with the current methodology. Energy consumption analysis showed that the modifications in constructive components influence the building's energy consumption and that the optimal cost associated to the different constructive solutions for the same building varies for each considered region.

Keywords: nZEB, asset rating, operational rating, buildings' energy performance classification, cost optimal

Resumo

O desenvolvimento económico prevalecente nas últimas décadas caracterizou-se pela utilização intensiva de energia produzida a partir do petróleo. A natureza finita dos recursos naturais e o impacto ambiental da sua produção e consumo alertaram o mundo para a necessidade de mudança dessas premissas. Um dos setores que apresenta uma percentagem elevada do consumo global de energia da União Europeia (40 %) é o dos edifícios (European Commission 2012). Assim, em 2010, deu-se a reformulação da Diretiva 2002/91/CE surgindo a Diretiva 2010/31/EU que promovia a melhoria do desempenho energético dos edifícios na comunidade e que introduz novos conceitos: edifícios com necessidades quase nulas de energia, ou *nearly zero-energy building* (nZEB), requisitos mínimos de desempenho energético e nível ótimo de rentabilidade. Esta nova diretiva reforça a necessidade do recurso à certificação energética, com fim à promoção de edifícios energeticamente mais eficientes.

A certificação energética tem por base dois métodos: *asset rating* (método em condições nominais) e *operational rating* (método operativo). Esta dissertação teve como objetivo um estudo comparativo das diferentes metodologias de classificação energética de edifícios de escritórios no âmbito da revisão regulamentar (RSECE). Este estudo foi realizado para dois edifícios de escritórios com características construtivas diferentes e em regiões distintas.

Outro dos conceitos introduzidos pela nova Diretiva é o de nível ótimo de rentabilidade. No decorrer desta dissertação procedeu-se à análise da influência dos elementos construtivos no consumo de energia para o edifício de escritórios localizado na região do Fundão. Com uma análise exata do comportamento energético do edifício para as diferentes soluções construtivas realizou-se um estudo económico relacionando o consumo de energia com o custo das soluções construtivas adotadas.

Concluiu-se que para ambos os casos as metodologias de classificação energética propostas não alteram a classificação energética dos edifícios, comparativamente à metodologia atual. A análise ao consumo de energia permite concluir que as alterações às componentes construtivas influenciam os consumos de energia do edifício e que o custo ótimo associado às diferentes soluções construtivas de um mesmo edifício varia de região para região.

Palavras-chave: nZEB, *asset rating*, *operational rating*, classificação energética, custo ótimo

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura	3
1.4	Motivação e contribuição original.....	3
2.	Regulamentação energética de edifícios em Portugal	5
2.1	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE,2006).....	5
2.2	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE,2006)	5
3.	Metodologias de classificação energética de edifícios	7
3.1	Simulação dinâmica multi-zona em condições nominais – $SD_{nominais}$ (RSECE 2006).....	7
3.2	Simulação dinâmica multi-zona em condições reais - SD_{reais} (RSECE em estudo).....	9
3.3	Cálculo dinâmico simplificado - CDs	12
4.	Caso de Estudo - Edifício Solar XXI	14
4.1	Localização e clima	14
4.2	Modelo	15
4.3	Características construtivas	15
4.4	Ocupação	16
4.5	Iluminação e Equipamentos	17
4.6	Sistema de Aquecimento e Arrefecimento	17
4.7	Produção de energia elétrica: Painéis Fotovoltaicos	19
4.8	Simulação detalhada.....	20
4.8.1	Simulação em condições reais.....	21
4.8.2	Simulação em condições de referência.....	22
4.8.3	Aplicação do RSECE (revisão)	24
4.8.4	Aplicação do RSECE (2006).....	24
4.9	Cálculo dinâmico simplificado.....	27
4.9.1	Determinação do indicador de eficiência energética- IEE	27
4.9.2	Determinação do indicador de eficiência energética de referência- IEE_{ref}	28
4.10	Síntese dos resultados do Edifício Solar XXI	28
5.	Caso de estudo - Edifício X.....	29
5.1	Localização e clima	29
5.2	Modelo	29
5.3	Características construtivas	31

5.4	Ocupação	32
5.5	Iluminação	32
5.6	Equipamento.....	33
5.7	Sistema AVAC	34
5.8	Simulação detalhada.....	34
5.8.1	Simulação em condições reais.....	34
5.8.2	Simulação em condições de referência.....	35
5.8.3	Aplicação do RSECE (revisão)	36
5.8.4	Aplicação do RSECE (2006).....	36
5.8.5	Simulação dinâmica após medidas de racionalização energética.....	38
5.9	Cálculo dinâmico simplificado.....	40
5.9.1	Caracterização dos consumos energéticos.....	40
5.9.2	Determinação da classe energética do edifício X.....	43
5.10	Síntese dos resultados do Edifício X	43
6.	Análise da influência dos elementos construtivos no consumo de energia	44
6.1	Variáveis construtivas	44
6.1.1	Isolamento térmico na envolvente do edifício.....	44
6.1.2	Vãos envidraçados.....	45
6.2	Variação das soluções construtivas e de perfis de utilização para dois climas distintos	46
6.2.1	Lisboa	46
6.2.2	Fundão	50
7.	Análise do nível ótimo de rentabilidade	53
7.1	Metodologia.....	54
7.2	Casos de estudo	55
7.2.1	Isolamento Térmico.....	55
7.2.2	Vãos envidraçados.....	56
8.	Conclusão	59
	Referências	61
	Anexo A – Temperaturas do solo para o clima de Lisboa e Fundão	63
	Anexo B – Cálculo para a obtenção do custo ótimo	65
	B1 – Região de Lisboa	65
	B2 – Região do Fundão	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Condições a verificar no cálculo da classe energética para um edifício tipo B	9
Tabela 2 – Elementos mínimos a considerar na caracterização do edifício para a simulação dinâmica multi-zona em condições reais	9
Tabela 3 - Fator solar de referência (g_{ref}) para os vãos envidraçados.....	11
Tabela 4 – Coeficientes de transmissão térmica de referência (U_{ref}) para os elementos opacos horizontais e verticais exteriores ou interiores	12
Tabela 5 – Classe energética em intervalos de valores de R	12
Tabela 6- Zonas e dados climáticos de referência para o concelho de Lisboa	14
Tabela 7 - Constituição e propriedades das paredes exteriores do Edifício Solar XXI.....	15
Tabela 8 - Constituição e propriedades do pavimento térreo do Edifício Solar XXI.....	16
Tabela 9 - Constituição e propriedades do pavimento interior (pisos 0 e 1) do Edifício Solar XXI	16
Tabela 10 - Densidade de ocupação nas zonas térmicas do Solar XXI.....	16
Tabela 11 – Densidades de potência de iluminação e equipamentos do Solar XXI.....	17
Tabela 12 – Energia elétrica anual produzida pelos sistemas fotovoltaicos do Edifício Solar XXI	20
Tabela 13 – Consumo de energia elétrica anual para o Edifício Solar XXI.....	21
Tabela 14 – Consumo de energia do Edifício Solar XXI em condições reais de utilização	22
Tabela 15 – Consumos energéticos para o Edifício Solar XXI em condições de referência	24
Tabela 16 – Condições nominais definidas pelo RSECE.....	24
Tabela 17 – Caudais mínimos de ar novo para o Edifício Solar XXI	26
Tabela 18 - Consumos de energia obtidos por simulação em condições nominais para o Solar XXI ..	26
Tabela 19 – Valores do IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S para o edifício Solar XXI	27
Tabela 20 – Classe energética do Edifício Solar XXI.....	27
Tabela 21 - Consumo de energia obtido por CD_s para o Solar XXI.....	27
Tabela 22 – Consumos energéticos e respetivos indicadores de eficiência energética	28
Tabela 23 – Classe energética obtida pelas diferentes metodologias para o Edifício Solar XXI.....	28
Tabela 24- Zonas e dados climáticos de referência para o concelho Y	29
Tabela 25 – Características das zonas térmicas do piso térreo do edifício X.....	30
Tabela 26 - Características das zonas térmicas do piso 1 do edifício X.....	31
Tabela 27 – Características das zonas térmicas do piso 2 do edifício X	31
Tabela 28 – Constituição e propriedades dos elementos verticais do edifício(Moita 2010)	31
Tabela 29 – Constituição e propriedades dos elementos horizontais do edifício(Moita 2010).....	31
Tabela 30 – Constituição e propriedades das portas do edifício (Moita 2010)	32
Tabela 31 – Propriedades do vidro utilizado nos vãos do edifício	32
Tabela 32 – Densidade de ocupação nas zonas térmicas do edifício X	32
Tabela 33 – Densidades de potência relativas à iluminação por zona térmica.....	33
Tabela 34 - Densidades de potência relativas aos equipamentos por zona térmica	33

Tabela 35 – Eficiência do sistema de climatização	34
Tabela 36 – Consumos de energia elétrica anuais do edifício X.....	34
Tabela 37 – Propriedades do sombreamento do edifício X.....	34
Tabela 38 – Consumo de energia obtido por simulação em condições reais para o edifício X	35
Tabela 39 – Indicador de eficiência energética do edifício X de referência	36
Tabela 40 – Indicador de eficiência energética e classe energética para o edifício X pelo SD_{reais}	36
Tabela 41 - Consumos de energia obtidos por simulação em condições nominais para o edifício X...	36
Tabela 42 – Valores do IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S para o edifício X	38
Tabela 43 – Classe energética do edifício X	38
Tabela 44 – Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso Térreo)	40
Tabela 45 - Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso 1).....	40
Tabela 46 - Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso 2).....	41
Tabela 47 – Orientação da área da envolvente exterior (Piso Térreo)	41
Tabela 48 - Orientação da área da envolvente exterior (Piso 1).....	41
Tabela 49 - Orientação da área da envolvente exterior (Piso 2).....	42
Tabela 50 – Consumo de energia para cada zona térmica.....	42
Tabela 51 – Classe energética do edifício X a partir do método horário simplificado	43
Tabela 52 – Classe energética obtida pelas diferentes metodologias para o Edifício X	43
Tabela 53 – Características das paredes internas do edifício X	44
Tabela 54 – Características das paredes exteriores do edifício X	45
Tabela 55 – Propriedades do vidro simples da fachada do edifício	45
Tabela 56 – Propriedades do vidro duplo da fachada do edifício	45
Tabela 57 – Propriedades do vidro duplo de baixo fator solar da fachada do edifício.....	45
Tabela 58 – Consumo energético de AVAC em função da espessura do isolamento térmico.....	46
Tabela 59 – Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro simples)	47
Tabela 60 - Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro duplo incolor)	48
Tabela 61 - Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro duplo de baixo fator solar)	48
Tabela 62 – Consumo total de energia em diferentes percentagens de vãos envidraçados e tipos de vidro	51
Tabela 63 – Comparação dos resultados obtido pelos métodos: $SD_{nominais}$, SD_{reais} , CD_s	59

Índice de Figuras

Figura 1 – Consumo final de energia para a União Europeia por produto energético final (DGEG,2012).....	1
Figura 2 – Síntese da simulação dinâmica multi-zona em condições nominais.....	8
Figura 3 – Requisitos para o cálculo do IEE_{ref}	11
Figura 4 - Síntese da simulação dinâmica multi-zona em condições reais.....	12
Figura 5 – Modelo 5R1C de acordo com a norma ISO 13790:2008.....	13
Figura 6 - Síntese da obtenção do IEE e IEE_{ref} a partir do cálculo dinâmico simplificado.....	13
Figura 7 – Edifício Solar XXI.....	14
Figura 8 - Modelo do edifício Solar XXI no <i>software Design builder</i>	15
Figura 9 – Coletores solares térmicos CPC do Edifício Solar XXI.....	18
Figura 10 – Sistema de aquecimento do Solar XXI a) Radiadores b) Caldeira a gás.....	18
Figura 11 – Sistema de tubos enterrados no Edifício Solar XXI.....	19
Figura 12 – Sistema fotovoltaico do Edifício Solar XXI: a) Fachada sul b) Parque estacionamento ...	19
Figura 13 –Design Builder - a) Definição das densidades de ocupação e equipamentos; b) definição do sistema de climatização.....	21
Figura 14 – Método para a determinação da categoria de edifício passivo, híbrido ou convencional ..	22
Figura 15 – Perfil anual das temperaturas interiores do piso -1 do Solar XXI.....	23
Figura 16 – Perfil anual das temperaturas interiores do piso 1 do Solar XXI.....	23
Figura 17 – Indicadores de eficiência energética e classe energética do Edifício Solar XXI obtidos pelo SD_{reais}	24
Figura 18 – Perfil horário da iluminação em condições nominais.....	25
Figura 19 – Perfil horário dos equipamentos em condições nominais.....	25
Figura 20 – Perfil horário da ocupação em condições nominais.....	25
Figura 21 – Indicadores de eficiência energética do Solar XXI obtidos pelo CD_s	28
Figura 22 - Modelo do edifício no <i>software Design builder</i>	29
Figura 23 - Planta do edifício X (Piso Térreo).....	30
Figura 24 – Planta do edifício X (Piso 1).....	30
Figura 25 – Planta do edifício X (Piso 2).....	30
Figura 26 – Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes setores em condições reais.....	35
Figura 27 - Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes sectores da simulação em condições nominais.....	37
Figura 28 – Método para verificar a necessidade de um PRE.....	38
Figura 29 - Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes sectores obtido com o método horário simplificado.....	42
Figura 30 – Parede simples de fachada com isolamento térmico pelo exterior.....	44
Figura 31 – Dados da radiação solar e temperaturas exteriores para Lisboa.....	46

Figura 32 – Consumo de AVAC em função da espessura do isolamento térmico para a região de Lisboa.....	47
Figura 33 – a) Necessidades de aquecimento em função da % de vãos envidraçados para vidro simples (VS), vidro duplo (VD) e vidro duplo com baixo g_s (Vg_s); b) Necessidades de arrefecimento em função da % de vãos envidraçados para VS,VD e Vg_s	49
Figura 34 – Consumo total de energia em função da percentagem de vãos envidraçados e do tipo de vidro utilizado	50
Figura 35 - Dados da radiação solar e temperaturas exteriores para o Fundão	50
Figura 36 - Consumo de AVAC em função da espessura do isolamento térmico para a região do Fundão num perfil de escritórios.....	51
Figura 37 - Consumo total de energia em função da percentagem de vãos envidraçados e do tipo de vidro utilizado para o perfil Escritório na região do Fundão.....	52
Figura 38 – Esquema ilustrativo da determinação do custo ótimo.....	53
Figura 39 – Metodologia de cálculo para o custo ótimo (BPIE 2010).....	54
Figura 40 – Custo ótimo da implementação de variadas espessuras de isolamento térmico	55
Figura 41 - Custo ótimo para diferentes tipos de vidros na região do Fundão.....	56
Figura 42 – Custo ótimo para diferentes tipos de vidros na região de Lisboa.....	56
Figura 43 – Análise comparativa do custo global nas regiões do Fundão e de Lisboa para as diferentes percentagens de vãos envidraçados	57

Siglas

ADENE	Agência para o ambiente
AQS	Águas quentes sanitárias
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
CD _s	Cálculo dinâmico simplificado
CE	Certificado energético
COP	Coefficient of performance
CPC	Concentrador Parabólico Composto
DGEG	Direcção geral de energia e geologia
Energy plus	<i>Software</i> acreditado pela ASHRAE para determinação dos consumos energéticos de um edifício ou fração do mesmo
EPBD	<i>Energy performance of buildings directive</i>
EPS	Poliestireno expandido moldado
ER	Energias renováveis
GEE	Gases com efeito de estufa
GES	Grandes edifícios de serviços
N, S, E, W, SE, SW NE, NW	Pontos cardeais (norte, sul, este, oeste, sudeste, sudoeste, nordeste, noroeste)
	nZEB <i>Nearly zero-energy building</i>
PRE	Plano de racionalização energética
RCCTE	Regulamento das características do comportamento térmico dos edifícios
RSECE	Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios
SCE	Sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar
SD _{nominais}	Simulação detalhada em condições nominais (RSECE2006)
SD _{reais}	Simulação detalhada em condições reais
VD	Vidro duplo
Vg _s	Vidro duplo com baixo fator solar
VRV	Volume de refrigerante variável
VS	Vidro simples
XPS	Poliestireno expandido extrudido

Nomenclatura

A_c	Área de pavimento climatizada	(m ²)
A_{ext}	Área da superfície envolvente exterior	(m ²)
A_{floor}	Área de pavimento climatizada	(m ²)
A_{int}	Área da envolvente interior	(m ²)
Am	Área de massa térmica equivalente dos elementos em contato com o volume de ar interior	(adim.)
A_p	Área útil de pavimento	(m ²)
$C_{a,i}$	Custo anual de energia	(€)
C_g	Custo global	(€/m ²)
C_I	Custo de investimento inicial	(€)
Cm	Capacidade térmica dos elementos em contato com o volume de ar interior	(adim.)
C_{m2}	Preço do material por unidade de área	(€ m ⁻²)
C_{manut}	Despesas com a manutenção	(€)
$C_z \frac{dT_z}{dt}$	Energia armazenada no ar	(kWh)
e	Espessura do material	(m)
$E_{ren,i}$	Produção de energia por fonte de energia i a partir de fontes de origem renovável para consumo e/ou exportação	(kWh ano ⁻¹)
$E_{s,i}$	Consumo de energia por fonte de energia i para uso do tipo S	(kWh ano ⁻¹)
$E_{T,i}$	Consumo de energia por fonte de energia i com uso do tipo T	(kWh ano ⁻¹)
F_{ci}	Fator de correção do consumo de energia para aquecimento	(adim.)
F_{cv}	Fator de correção do consumo de energia para arrefecimento	(adim.)
FF	Fator de forma	(adim.)
$F_{pu,i}$	Fator de conversão de energia útil para energia primária	(kgep kWh ⁻¹)
GD	Graus dia	(°C dia)
g_s	Fator solar	(adim.)
g_{ref}	Fator solar de referência	(adim.)
$H_{tr,em}$	Condutância entre o ar exterior e o nó T _m	(W K ⁻¹)
$H_{tr,is}$	Condutância entre os nós T _i e T _s	(W K ⁻¹)
$H_{tr,ms}$	Condutância entre os nós T _m e T _s	(W K ⁻¹)
$H_{tr,w}$	Condutância de transferência de calor para os elementos leves	(W K ⁻¹)
H_{ve}	Condutância de ventilação entre o ar exterior e o nó T _i	(W K ⁻¹)
IEE	Indicador de eficiência energética para o MDmz	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_I	Indicador de eficiência energética para aquecimento	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)

IEE_{MRE}	Indicador de eficiência energética após a implementação de medidas de racionalização energética	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_{nom}	Indicador de eficiência energética em condições nominais	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
$IEE_{real,fatura}$	Indicador de eficiência energética obtido a partir da faturação média dos últimos três anos	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
$IEE_{real,simulação}$	Indicador de eficiência energética obtido por simulação dinâmica	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_{ref}	Indicador de eficiência energética para um edifício em condições de referência	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
$IEE_{ref,novos}$	Indicador de eficiência energética de referência para edifícios novos	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_{ren}	Energia elétrica com fim a auto consumo ou exportação ou energia térmica passível de ser utilizada no edifício ou edifícios vizinhos	(kwh m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_s	Consumo de aquecimento/arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas sanitárias, iluminação interior	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
$IEE_{s,ref}$	Consumo de aquecimento/arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas sanitárias, iluminação interior para o edifício em condições de referência	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_T	Consumos não considerados para efeitos de cálculo de classificação energética(equipamentos, iluminação exterior)	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_V	Indicador de eficiência energética de arrefecimento	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
$m_{inf}c_p(T_{inf} - T_z)$	Calor transferido por infiltração de ar exterior	(W)
N_{II}	Necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE para a região de referência	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
N_{Ii}	Necessidades máximas de aquecimento calculadas para a região real do edifício	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
N_{VI}	Necessidades máximas de arrefecimento permitidas pelo RCCTE para a região de referência	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
N_{Vi}	Necessidades máximas de arrefecimento calculadas para a região real do edifício	(kWh m ⁻² ano ⁻¹)
P	Tempo de vida do edifício	(anos)
P_d	Pé direito	(m)
Q_{aq}	Consumo de energia para aquecimento	(kgep ano ⁻¹)
Q_{arref}	Consumo de energia para arrefecimento	(kgep ano ⁻¹)
Q_{ilum}	Consumo de energia elétrica em iluminação	(kWh ano ⁻¹)
$Q_{sistema}$	Carga térmica de AVAC em cada zona térmica	(W)
Q_{out}	Consumo de energia não ligado aos processos de aquecimento e arrefecimento	(kgep ano ⁻¹)
R	Taxa de desconto	(adim.)
$R_d(i)$	Fator de desconto	(adim.)
$R_{elemento}$	Resistência térmica do elemento i	(m ² K W ⁻¹)

R_{total}	Resistência térmica do material no seu todo	(m ² K W ⁻¹)
S	Parâmetro de referência para o cálculo da classe energética definido no anexo IV do Despacho nº. 10250/2008	(kgep m ⁻² ano ⁻¹)
$T_{cooling}$	Temperatura de arrefecimento	(°C)
T_e	Temperatura de estrela	(°C)
T_{heat}	Temperatura de aquecimento	(°C)
T_i	Temperatura média do ar interior	(°C)
T_{int}	Temperatura interior	(°C)
T_m	Temperatura de massa	(°C)
T_{solo}	Temperatura do solo	(°C)
T_{sup}	Temperatura do ar para ventilação	(°C)
$U_{s/caixilho}$	Coeficiente de transmissão térmica do vidro sem caixilho	(W m ⁻² K ⁻¹)
U_{ref}	Coeficiente de transmissão térmica de referência	(W m ⁻² K ⁻¹)
U	Coeficiente de transmissão térmica total do componente	(Wm ⁻² K ⁻¹)
V	Volume interior do edifício	(m ³)
$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$	Calor convectivo transferido pelas zonas térmicas	(W)
$\sum_{i=1}^{N_z} m_i c_p (T_{zi} - T_z)$	Trocas de calor por mistura de ar entre zonas	(W)
$\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i$	Somatório dos ganhos internos convectivos	(W)
ϵ_{elem}	Preço da energia elétrica por unidade de energia	(€ kWh ⁻¹)

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O desenvolvimento económico prevaemente nas últimas décadas caracterizou-se pela utilização intensiva de energia produzida a partir do petróleo (Figura 1).

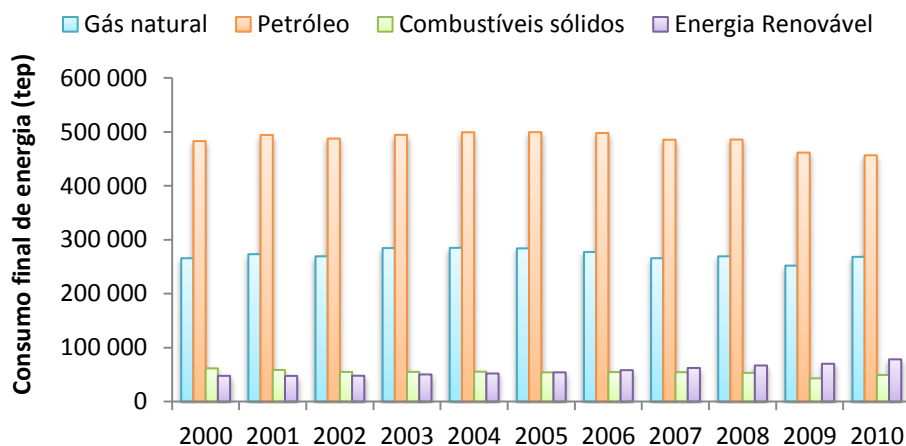


Figura 1 – Consumo final de energia para a União Europeia por produto energético final (DGE, 2012)

Como se pode verificar pela Figura 1, o consumo de petróleo é bastante elevado comparativamente aos outros recursos. Apesar desse consumo ter vindo a descer ao longo da última década este mantém-se elevado. O consumo de energia proveniente de recursos renováveis é o menor.

A natureza finita dos recursos naturais e o impacto ambiental da sua produção e consumo, alertaram o mundo para a necessidade de mudança dessas premissas. Diversos estudos científicos têm vindo a alertar para o facto de as temperaturas globais poderem aumentar de 1,4 °C a um máximo de 5,8 °C, se não forem controladas imediatamente as taxas de poluição. As consequências do aquecimento global, tais como a desertificação, migração das populações, erosão da costa marítima, perda de biodiversidade, entre outros, são alarmantes e podem tornar-se catastróficas. Aliada a esta realidade surgem ainda as evidências da globalização que hoje demonstram a interdependência de fatores, tais como o acesso e a utilização de energia e o desenvolvimento económico, as preocupações ambientais e climáticas, entre outros.

Um dos setores que apresenta uma percentagem elevada do consumo global de energia da União Europeia (40 %) é o dos edifícios (European Commission 2012). Este facto despertou a necessidade de se tomar medidas importantes para esta situação. Assim, a redução do consumo de energia e o recurso a energias renováveis nos edifícios são medidas importantes para a redução da dependência energética e dos gases com efeito de estufa (GEE) na União Europeia.

No século XX, até à década de 90, não existiam, em Portugal, requisitos térmicos para as habitações. Em 2002, criou-se uma diretiva que promovia a melhoria do desempenho energético dos edifícios na comunidade, tendo em conta as condições climáticas exteriores locais e as exigências do conforto térmico interior. A Diretiva 2002/91/CE foi reformulada e em 2010 surge a Diretiva 2010/31/EU que introduz novos conceitos: edifícios com necessidades quase nulas de energia, ou *nearly zero-energy building* (nZEB), requisitos mínimos de desempenho energético e o de nível ótimo de rentabilidade.

A Diretiva 2010/31/EU, ou *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), impõe, a todos os Estados Membros, que até 31 de dezembro de 2020 os novos edifícios sejam nZEB e que os edifícios ocupados e detidos por entidades públicas obtenham a mesma classificação até 2018.

A Diretiva 2010/31/EU define que edifícios nZEB são aqueles que apresentam um elevado desempenho energético, ou seja, devem ser edifícios de baixas necessidades e que tenham parte da sua energia a ser produzida no edifício ou nas suas imediações. Porém, apesar da Diretiva referir edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB), não existe uma definição deste conceito comum a todos os Estados Membros.

A EPBD introduz, também, o conceito de custo ótimo em termos de rentabilidade. Este é definido como sendo o desempenho energético que conduz ao custo mais baixo durante todo o ciclo de vida económico do edifício.

Além da introdução destes novos conceitos houve um “reforço” da formulação do certificado energético. Os certificados devem incluir melhorias rentáveis a um custo ótimo, ou seja, alterações ao edificado que levem ao decréscimo do consumo energético a um custo compensatório. Torna-se obrigatória a emissão e afixação do certificado energético no ato da construção, publicitação, venda ou arrendamento de um edifício.

O certificado energético (CE) é um documento emitido no âmbito do Sistema Nacional de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior dos Edifícios, que traduz o desempenho energético do edifício. A classe energética, representativa do desempenho energético do edifício, é calculada com base nas características construtivas do mesmo, na sua forma, nos sistemas de ventilação, e no tipo de combustíveis usados nos sistemas de climatização e produção de águas quentes. O CE é uma importante ferramenta para caracterização das oportunidades de melhoria do desempenho energético e do comportamento térmico do edifício. As medidas de melhoria variam de edifício para edifício podendo passar pela aplicação de isolamento térmico (no caso da sua ausência), na substituição ou instalação de vãos com caixilharia de elevado desempenho térmico, aplicação de sistemas de energias renováveis e utilização de equipamentos mais eficientes.

Em Portugal e na maioria dos países europeus, a certificação energética baseia-se no método *asset rating* (método em condições nominais), tanto para edifício residenciais como de serviços. O método *asset rating* é baseado no cálculo da energia primária em condições padrão. Nestas condições é possível a comparação entre edifícios havendo uma enfatização do potencial energético eficiente. Outro método para o cálculo da energia primária, necessária para a determinação do certificado energético, é o *operational rating* (método operativo), ou seja, um método baseado na energia medida do edifício tendo em conta a energia efetiva, assim como as condições climáticas reais. O *operational rating* tem em conta o cálculo dinâmico simplificado com base no modelo horário da norma ISO 13790/2008. O modelo da norma ISO 13790/2008 é o 5R1C que considera a existência de uma única zona térmica simplificada com cinco resistências e uma capacitância. Porém, este modelo horário é apenas utilizado para o cálculo da energia consumida por um edifício de referência com as mesmas condições do edifício real (Reis 2011; Panão, Gouveia et al. 2012).

Deste modo, com a introdução desta nova Diretiva o setor da energia nos edifícios tornou-se um centro de atenção, influenciando novas atitudes e cuidados no planeamento e construção dos edifícios.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se comparar o método atual de determinação da classe energética em edifícios de escritórios existentes (simulação dinâmica multi-zona em condições nominais) e os métodos previstos na revisão regulamentar em curso (simulação dinâmica multi-zona em condições reais e cálculo dinâmico simplificado). Os métodos propostos diferem do atual uma vez que:

- Ambos consideram os perfis reais de utilização do edifício em estudo;
- A simulação dinâmica multi-zona em condições reais recorre à simulação do edifício em condições de referência, valor que serve de comparação aos dados obtidos pela simulação em condições reais e torna possível a determinação da classe energética;
- O segundo recorre ao cálculo dinâmico simplificado para a determinação do valor de referência que serve de comparação com os dados obtidos por uma auditoria energética e torna possível a determinação da classe energética.

Procura-se, adicionalmente, analisar a influência de elementos construtivos no consumo de energia em edifícios existentes de escritórios, variando a espessura do isolamento térmico e o tipo dos vãos envidraçados. Por fim, pretende-se calcular o custo associado às diferentes soluções construtivas e determinar a solução que conduz ao custo ótimo.

1.3 Estrutura

O presente capítulo pretende fazer uma introdução às questões abordadas na dissertação, ilustrando os objetivos e a motivação para a realização da mesma.

O capítulo dois apresenta a regulamentação em Portugal associada à estratégia do comportamento térmico e dos sistemas energéticos na área de edifícios. Os regulamentos descritos são o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).

A regulamentação portuguesa incentiva a determinação da classe energética em edifícios com fim a demonstrar o comportamento energético de cada um, potencializando o mercado e alterações para melhoria de eficiência. O capítulo três expõe os diferentes métodos para o cálculo do indicador de eficiência energética com fim à obtenção do CE.

Nos capítulos 4 e 5 são descritos os casos de estudos, iniciando-se com um edifício na região de Lisboa (Solar XXI) seguindo para um edifício na região do Fundão, ambos em edifícios de escritórios.

Alguns parâmetros construtivos podem influenciar os consumos de energia. Deste modo, o capítulo 6 retrata a variação dos consumos de acordo com as alterações nos componentes construtivos. Alguns exemplos dessas alterações são: variação da espessura do isolamento térmico, variação da percentagem de vãos envidraçados e alteração do tipo de vidro utilizado nos vãos. Este estudo foi realizado para o edifício descrito no capítulo 5.

Prosseguindo, o capítulo 7 introduz o conceito de custo ótimo, evidenciado na Diretiva 2010/31/EU, e relata os pontos ótimos para as situações estudadas no capítulo anterior.

Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões obtidas após a análise dos resultados encontrados para os diferentes casos de estudo, seguidas por uma comparação entre os métodos abordados no capítulo 3.

1.4 Motivação e contribuição original

O setor dos edifícios consome cerca de 40 % da energia total final na União Europeia. Os edifícios de serviços, os grandes edifícios de serviços, têm consumos de energia superiores ao setor dos edifícios residenciais. Tal fato deve-se à utilização de equipamentos de maior potência, de densidades de potência de iluminação superiores e, até, a situações comportamentais.

O recurso ao modelo de cálculo a partir de simulação dinâmica, estabelecido pelo regulamento atual, permite calcular o indicador de eficiência energética em condições nominais, estabelecendo perfis nominais tabelados. Este método define que os edifícios de uma determinada categoria apresentam o mesmo perfil horário de utilização de equipamentos e iluminação, assim como a percentagem de ocupação do edifício. Além de ter em consideração perfis fixos, é necessário proceder-se à construção de um modelo explícito do edifício tendo em conta as características construtivas reais do mesmo. No caso de edifícios antigos, o levantamento/acesso à informação dos elementos construtivos e técnicos do edifício em estudo não é facilitada, tornando de difícil tarefa a construção de um modelo fidedigno.

No processo da revisão regulamentar foi proposto a criação de um modelo simplificado que não necessitasse de uma caracterização exaustiva do edifício em termos geométricos e construtivos e que fosse possível a criação de perfis de utilização de acordo com os reais. Este modelo tem por base o modelo 5R1C, designando-se por cálculo dinâmico simplificado.

Presentemente encontram-se em revisão os regulamentos portugueses associados ao setor dos edifícios (RCCTE e RSECE) com o objetivo de proceder a alterações nos métodos de obtenção do indicador de eficiência energética. Esta revisão prevê que seja possível determinar a classificação energética por dois métodos: o método simplificado (descrito anteriormente), que considera os consumos efetivos do edifício e um método de simulação dinâmica, aquando a disponibilização de informação dos elementos construtivos. Em ambos os métodos recorre-se aos perfis reais sempre que esses sejam conhecidos.

O contributo desta dissertação passa, inicialmente, pela análise de diferentes casos de estudos, com perfis de utilização diferentes, e pela classificação energética a partir da comparação dos métodos previstos (simulação detalhada em condições reais e cálculo dinâmico simplificado) com o método em vigor (simulação detalhada em condições nominais). Esta análise comparativa tem como objetivo apurar a variabilidade na classificação energética quando se recorre ao conjunto dos métodos em estudo.

Devido à introdução de um novo conceito na Diretiva 2010/31/EU, o conceito de ótimo de rentabilidade, procedeu-se, também, a uma análise energética do edifício resultante de alterações nas soluções construtivas (isolamento térmico, vãos envidraçados) e à determinação do ótimo de rentabilidade para as diferentes situações. Esta análise promove um maior conhecimento das possíveis modificações nas soluções construtivas de grandes edifícios de serviços e serve ao estabelecimento de futuros requisitos mínimos a adotar na legislação nacional.

2. Regulamentação energética de edifícios em Portugal

2.1 Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE,2006)

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) integra o Decreto-Lei n.º80/2006. Este foi um dos instrumentos legais em Portugal que impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações com fim a salvaguardar a satisfação das condições de conforto nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia em qualquer altura do ano.

Enquanto que no final da década de 80 eram poucos os edifícios que dispunham de meios ativos de controlo das condições ambientais interiores, verifica-se que, atualmente, houve um aumento de equipamentos de climatização. Esta alteração de comportamento levou ao aumento dos consumos de energia relacionados com o aquecimento/arrefecimento nos edifícios.

No contexto internacional é consensual a necessidade de melhorar a qualidade dos edifícios e reduzir os seus consumos de energia e as correspondentes emissões de GEE que contribuem para o aquecimento global e efeito de estufa.(Decreto-Lei n.º80/2006 2006).

A aplicação do RCCTE pode ser feita a:

- Edifícios habitacionais;
- Edifícios de serviços com área útil de pavimento inferior a 1 000 m² e sem sistemas mecânicos de climatização ou com sistemas de climatização de potência inferior a 25 kW;
- Grandes intervenções de remodelações ou de alteração na envolvente ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias das duas tipologias de edifícios referidas anteriormente.
- Ampliação de edifícios existentes, das duas tipologias atrás referidas, exclusivamente na nova área construída.

O RCCTE obriga ainda à utilização de sistemas solares térmicos para produção de águas quentes sanitárias (AQS) sempre que exista exposição solar adequada, com base do 1 m² de coletor solar por ocupante, não existindo obrigação de preenchimento total da área de exposição solar para além dos 50 %. Considera-se que a exposição solar é adequada quando a instalação dos coletores solares térmicos é feita em cobertura plana (terraço) ou em cobertura com inclinação orientada para Sul. Pode ser, ainda, considerada a instalação de outros sistemas de energias renováveis, em substituição do sistema solar térmico, desde que a energia produzida por esses sistemas seja igual ou superior à produzida pelo sistema solar térmico.

2.2 Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE,2006)

O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) integra um pacote legislativo composto também pelo SCE (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar interior nos Edifícios) e pelo RCCTE. Com o RSECE há a exigência de uma monitorização da qualidade do ar interior nos edifícios de serviços no seu funcionamento.

Este regulamento aplica-se a:

- Grandes edifícios ou frações autónomas de serviços (existentes e novos) com área útil de pavimento superior a 1 000 m², ou no caso de edifícios do tipo centros comerciais, supermercados, hipermercados e piscinas cobertas, com área superior a 500 m²;
- Novos pequenos edifícios ou frações autónomas de serviços com sistemas de climatização com potência instalada superior a 25 kW;

- Novos edifícios de habitação ou cada uma das frações autónomas com sistemas de climatização com potência instalada superior a 25 kW;
- Novos sistemas de climatização a instalar em edifícios ou frações autónomas existentes, de serviços ou de habitação, com potência instalada igual ou superior a 25 kW em qualquer tipologia de edifícios;
- Grandes intervenções de reabilitações relacionadas com a envolvente, as instalações mecânicas de climatização ou os demais sistemas energéticos dos edifícios de serviços;
- Ampliações dos edifícios existentes em que a intervenção não atinja o limiar definido para ser considerada uma grande intervenção de reabilitação.

O RSECE impõe um conjunto de exigências em diferentes vertentes: nas condições de conforto térmico e de higiene; no estabelecimento de padrões de melhorias da eficiência energética global dos edifícios; na imposição de regras de eficiência aplicadas aos sistemas de climatização de modo a melhorar o seu desempenho energético e na monitorização das práticas de manutenção dos sistemas de climatização.

O desempenho energético, neste regulamento, passa pela determinação do indicador de eficiência energética (IEE), expresso em energia primária por unidade de área útil de pavimento. Este indicador é calculado com base em condições nominais de utilização impostas pelo regulamento para o determinado edifício.

Além da necessidade de se efetuar a simulação do edifício em condições nominais para se poder obter o valor do indicador de eficiência energética, o RSECE em determinadas situações impõe a apresentação de um plano de racionalização de energia. O RSECE diz que se para edifícios já existentes o valor do IEE em condições nominais for superior ao IEE de referência (Anexo X do RSECE), será obrigatória a apresentação de um Plano de Racionalização de Energia (PRE) à Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) com fim à redução do consumo energético até ao limite que se encontra no regulamento.

Relativamente à qualidade do ar interior, este regulamento estabelece valores de caudais mínimos de renovação de ar novo interior, para edifícios novos, de acordo com a área de espaço e de tipologia.

3. Metodologias de classificação energética de edifícios

3.1 Simulação dinâmica multi-zona em condições nominais – SD_{nominais} (RSECE 2006)

O RSECE, em vigor, estabelece que os requisitos energéticos para a determinação dos consumos de energia de um edifício são calculados em condições padrão nominais de utilização definidas por uma portaria conjunta de diversas áreas. O consumo nominal específico de energia de um edifício é determinado através da simulação dinâmica multi-zona do edifício. O IEE_{nom} para este método, é calculado a partir dos consumos nominais anuais de um edifício convertidos para energia primária, utilizando fatores de conversão (Fator eletricidade= 0,29 kgep kWh⁻¹ e fator combustíveis=0,086 kgep kWh⁻¹). O presente método tem em conta a variabilidade climática das várias regiões de Portugal.

O IEE_{nom} é calculado a partir da seguinte equação:

$$IEE_{nom} = IEE_I + IEE_V + \frac{Q_{out}}{A_p} \quad (1)$$

em que IEE_I e IEE_V são os indicadores de eficiência energética de aquecimento e arrefecimento (kgep m⁻²ano⁻¹), respetivamente, Q_{out} o consumo de energia não ligado aos processos de aquecimento e arrefecimento (kgep ano⁻¹) e A_p a área útil de pavimento (m²).

Os IEE_I e IEE_V são dados pelas equações (2) e (3).

$$IEE_I = \frac{Q_{aq}}{A_p} \times F_{CI} \quad (2)$$

$$IEE_V = \frac{Q_{arref}}{A_p} \times F_{CV} \quad (3)$$

sendo Q_{aq} e Q_{arref} os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento (kgep ano⁻¹), respetivamente, e F_{CI} e F_{CV} os fatores de correção dos consumos de energia de aquecimento e arrefecimento (kgep ano⁻¹).

Os fatores de correção do consumo de energia dependem da região climática de referência e da zona do edifício em estudo. Para o caso de referência considera-se que a região é II-V1 norte, 1 000 graus-dia (GD) de aquecimento e 160 dias de duração da estação de aquecimento.

A correção para o consumo de energia de aquecimento (F_{CI}) é obtida através da equação (4).

$$F_{CI} = \frac{N_{II}}{N_{II}} \quad (4)$$

A correção para o consumo de energia de arrefecimento (F_{CV}) é dada pela equação (5).

$$F_{CV} = \frac{N_{V1}}{N_{VI}} \quad (5)$$

Os valores de N_{II} e N_{V1} são de referência para a região II-V1 norte tratando-se das necessidades máximas de aquecimento e arrefecimento permitidas pelo RCCTE (kWh m⁻² ano⁻¹).

Os valores de N_{II} e N_{VI} são as necessidades máximas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, calculadas para o edifício em estudo na sua localização real (kWh m⁻² ano⁻¹).

Para se poder calcular os valores das necessidades máximas de aquecimento e arrefecimento é necessário o cálculo prévio do fator de forma (equação (6)).

$$FF = \frac{A_{ext} + \sum (\tau A_{int})_i}{V} \quad (6)$$

onde, A_{ext} é a área da envolvente exterior (m^2), A_{int} a área da envolvente interior (m^2) e V o volume interior (m^3).

De acordo com RCCTE, se o fator de forma for igual ou inferior a 0,5, utiliza-se para o cálculo das necessidades nominais de energia útil, a equação (7).

$$N_i = 4,5 + 0,0395 \times GD \quad (7)$$

sendo, GD os graus-dia.

A Figura 2 sintetiza as características importantes para a obtenção do IEE_{nom} e IEE_{ref} a partir de simulação dinâmica multi-zona em condições nominais:

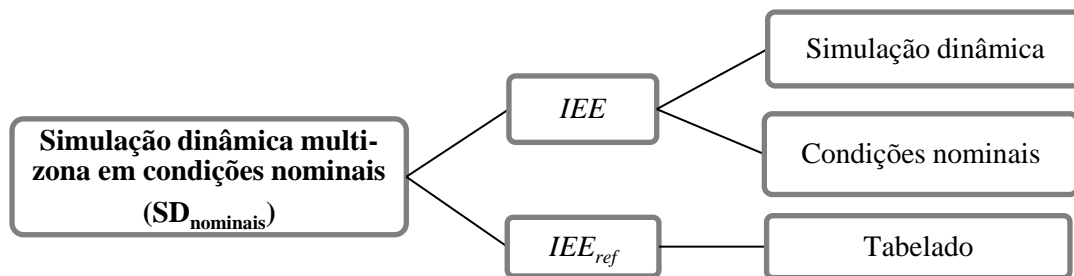


Figura 2 – Síntese da simulação dinâmica multi-zona em condições nominais

Um edifício pode, para efeitos de certificação energética e respetivo modelo de certificado, ser integrado na categoria de grandes serviços (GES), se a sua área útil for superior a 1 000 m^2 , dispondo também de sistema de climatização. Para esta categoria o certificado energético a emitir corresponde ao tipo B. A classe energética para edifícios, tanto novos como existentes, que sejam do tipo B é determinada com base nas seguintes variáveis (Despacho n.º 10249/2008 2008):

- Valor do indicador de eficiência energética obtido na base dos padrões nominais de utilização definidos no Anexo XV do Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril (IEE_{nom}) e calculado de acordo com o previsto no Anexo IX do mesmo decreto;
- Valor do indicador de eficiência energética de referência para edifícios novos ($IEE_{ref,novos}$), conforme definido no Anexo XI do Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril;
- Valor do parâmetro S , conforme definido no Anexo IV do presente despacho.

A conjugação destas variáveis deverá ser feita com recurso à Tabela 1.

Tabela 1 – Condições a verificar no cálculo da classe energética para um edifício tipo B

Classe energética	Condição a verificar
A ⁺	$IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} - 0,75 S$
A	$IEE_{ref,novos} - 0,75 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} - 0,50 S$
B	$IEE_{ref,novos} - 0,50 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} - 0,25 S$
B ⁻	$IEE_{ref,novos} - 0,25 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos}$
C	$IEE_{ref,novos} < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} + 0,50 S$
D	$IEE_{ref,novos} + 0,50 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} + 1,00 S$
E	$IEE_{ref,novos} + 1,00 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} + 1,50 S$
F	$IEE_{ref,novos} + 1,50 S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref,novos} + 2,00 S$
G	$IEE_{ref,novos} + 2,00 S < IEE_{nom}$

Deste modo é possível calcular o IEE_{nom} e determinar a classe energética do edifício em estudo através do método dinâmico aplicado pelo atual RSECE.

3.2 Simulação dinâmica multi-zona em condições reais - SD_{reais} (RSECE em estudo)

O RSECE em fase de estudo menciona que a determinação do IEE no método dinâmico multi-zona, tal como no regulamento atual, deve ser realizada por um programa acreditado pela norma *ASHRAE* 140-2007, tendo de ter capacidade para simular determinados critérios. O programa deve ter a capacidade de simular mais do que uma zona térmica, ter um perfil horário anual de 8 760 horas, poder proporcionar a variação horária das cargas térmicas (iluminação, ocupação, equipamentos), considerar o efeito da massa térmica do edifício assim como a modelação dos pontos de ajuste dos termostatos das zonas térmicas. Ao contrário do método atual, este prevê a introdução de perfis efetivos de utilização.

Na aplicação da simulação multi-zona em condições reais é necessário proceder ao levantamento/caracterização do edifício, considerando determinados elementos (Tabela 2):

Tabela 2 – Elementos mínimos a considerar na caracterização do edifício para a simulação dinâmica multi-zona em condições reais

Elemento	
Volume	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de espaço - Pé-direito - Áreas totais do pavimento do espaço, da envolvente vertical e da envolvente horizontal exterior e interior, opaca e envidraçada
Envolvente	- Materiais de construção ou características térmicas das soluções construtivas
Ocupação	- Densidade e perfil de ocupação
Sistemas de Climatização	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo e características térmicas dos sistemas para aquecimento e/ou arrefecimento - Perfil de utilização
Iluminação e Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Tipos e potências da iluminação interior e dos equipamentos - Perfil de utilização da iluminação interior e dos equipamentos

O IEE de um edifício de serviços é calculado com base no somatório dos diferentes consumos anuais de energia, agrupados em indicadores parciais convertidos em energia primária por unidade de área total de pavimento (8). Se a energia utilizada for energia elétrica, o valor de eficiência é de 2,5 e para o caso de combustíveis fósseis é de 1,0.

$$IEE = IEE_s + IEE_T - IEE_{ren} \quad (8)$$

O IEE_s representa os consumos de aquecimento/arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas sanitárias, iluminação interior, entre outros. Este indicador é obtido a partir da equação (9).

$$IEE_s = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{s,i} \times F_{pu,i}) \quad (9)$$

em que $E_{s,i}$ é o consumo de energia por fonte de energia i para uso do tipo S (kWh ano^{-1}), A_p é a área total de pavimento (m^2) e $F_{pu,i}$ o fator de conversão de energia útil para energia primária.

O IEE_T caracteriza os consumos que não são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício (iluminação exterior e elevadores/escadas rolantes (até 31 de Dezembro de 2015), equipamentos, ventilação e bombagem não associada ao controlo de carga térmica.

$$IEE_T = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{T,i} \times F_{pu,i}) \quad (10)$$

sendo $E_{T,i}$ o consumo de energia por fonte de energia i com uso do tipo T (kWh ano^{-1}).

O IEE_{ren} é a energia elétrica com fim a auto-consumo e exportação ou, no caso de energia térmica, a qual é utilizada ou passível de ser utilizada no edifício ou em edifícios vizinhos (térmica). O IEE_{ren} é obtido a partir da equação (11).

$$IEE_{ren} = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{ren,i} \times F_{pu,i}) \quad (11)$$

em que $E_{ren,i}$ é a produção de energia por fonte de energia i a partir de fontes de origem renovável para consumo e/ou exportação (kWh ano^{-1}).

Para edifícios existentes, estes indicadores são preferencialmente obtidos a partir dos consumos efetivos do edifício.

A classe energético de um edifício é obtida através do valor de R. Esta variável é dada pelo quociente entre o indicador de eficiência energética, IEE_s , e o indicador de eficiência energética de um edifício de referência ($IEE_{s,ref}$).

$$R = \frac{IEE_s - IEE_{ren}}{IEE_{s,ref}} \quad (12)$$

O IEE_{ref} é calculado a partir do método utilizado para o cálculo do IEE , sem considerar energias renováveis. Apesar do método ser o mesmo, o cálculo deste indicador (IEE_{ref}) impõe condições térmicas ao edifício.

A determinação do IEE_{ref} , para este método, tem de respeitar, para além dos coeficientes de transmissão térmica de referência, outras condições. Os dados climáticos importados no programa de simulação dinâmica têm de ser disponibilizados pela entidade gestora do SCE. Os perfis de utilização devem ser os perfis horários reais, assim como as eficiências dos sistemas de climatização. Na envolvente exterior, os vãos envidraçados devem respeitar o fator solar correspondente à zona climática e o sombreamento móvel deve ser acionado sempre que a radiação incidente na fachada seja superior a 300 W/m^2 . As temperaturas de *set-point*, para um edifício convencional, utilizadas na simulação são de 20°C (aquecimento) e 25°C (arrefecimento). Na Figura 3 constam outros requisitos a considerar no cálculo do IEE_{ref} .

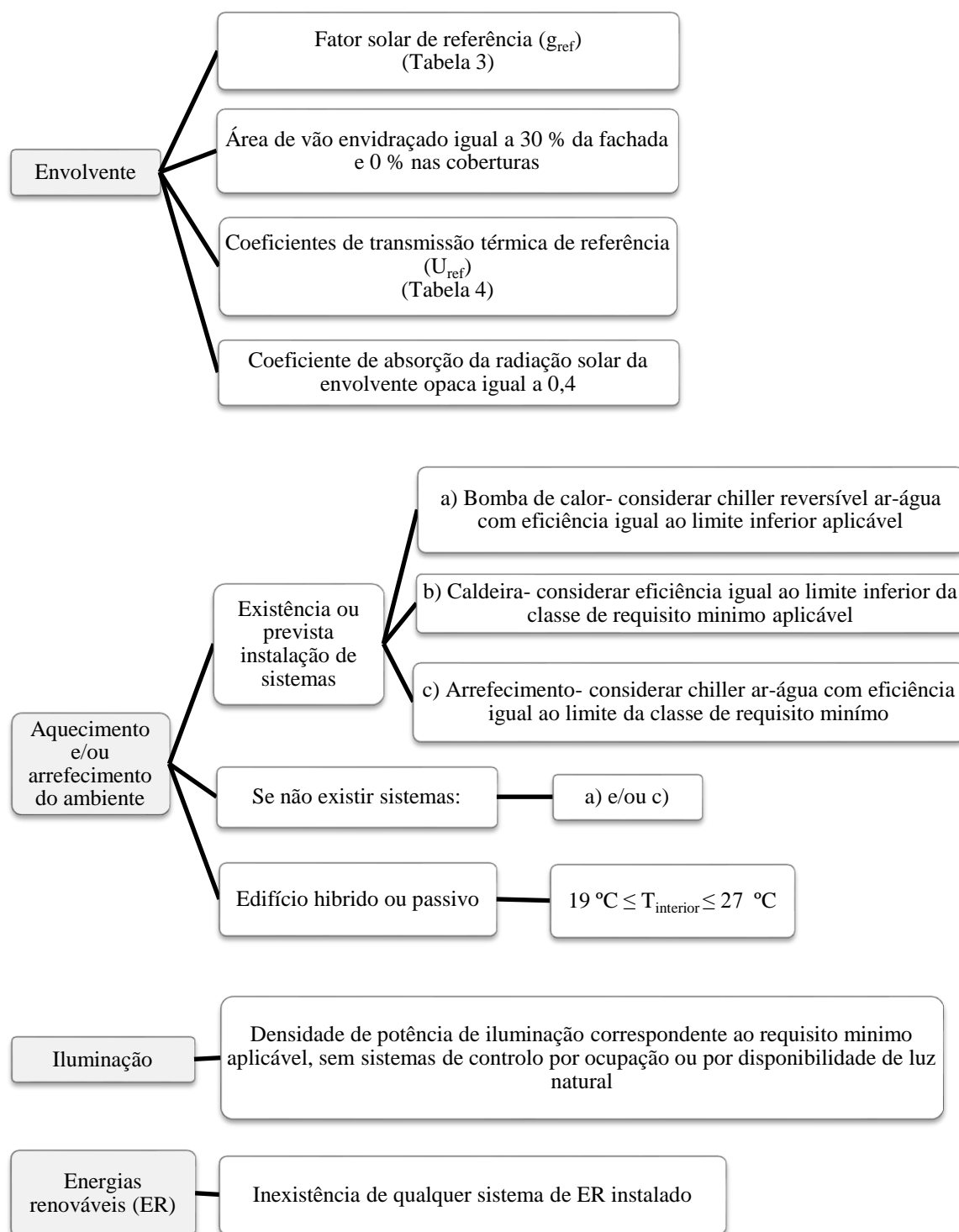


Figura 3 – Requisitos para o cálculo do IEE_{ref}

Tabela 3 - Fator solar de referência (g_{ref}) para os vãos envidraçados

Zona Climática	I ₁	I ₂	I ₃
Fator solar dos vãos envidraçados	0,25	0,20	0,15

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão térmica de referência (U_{ref}) para os elementos opacos horizontais e verticais exteriores ou interiores

Zona da envolvente	Zona Climática			
	I ₁	I ₂	I ₃	RA
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,7	0,6	0,5	1,4
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,5	0,45	0,4	0,8
Vãos envidraçados exteriores	4,3	3,3	3,3	4,3

A Figura 4 ilustra as condições para a obtenção do IEE e IEE_{ref} através de simulação dinâmica multi-zona em condições reais de utilização.

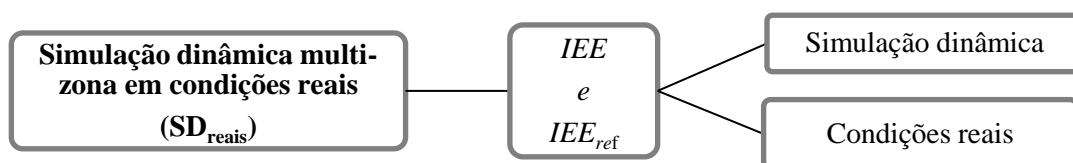


Figura 4 - Síntese da simulação dinâmica multi-zona em condições reais

Por fim, a escala de classificação energética dos edifícios, para esta metodologia, é representada por intervalos de valores de R (Despacho n.º 10249/2008 2008), correspondendo cada intervalo a uma classe energética.

Tabela 5 – Classe energética em intervalos de valores de R

Classe Energética	Valor de R
A ⁺	$R \leq 0,25$
A	$0,25 < R \leq 0,50$
B	$0,50 < R \leq 0,75$
B ⁺	$0,75 < R \leq 1,00$
C	$1,00 < R \leq 1,50$
D	$1,50 < R \leq 2,00$
E	$2,00 < R \leq 2,50$
F	$2,50 < R \leq 3,00$
G	$R \geq 3,00$

3.3 Cálculo dinâmico simplificado - CDs

O cálculo do IEE_{ref} pelo método dinâmico simplificado tem como base o balanço de energia numa escala horária. O modelo que incorpora este método é o 5R1C descrito na norma EN ISO 13790:2008 para a estimativa das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento.

O uso da norma EN ISO 13790:2008 deve assumir como simplificações, os seguintes elementos:

- Cálculo das necessidades para uma zona térmica;
- Introdução de perfis de utilização em hora solar;
- Acionamento de dispositivos de sombreamento sempre que a radiação incidente na fachada for superior a 300 W/m^2 ;
- Fator solar, fração envidraçada, coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior, interior e em contato com o solo calculados de acordo com RCCTE.

O modelo 5R1C tem como apresentação uma zona térmica por três nodos: temperatura média do ar interior (T_i); temperatura estrela (T_s) e temperatura de massa (T_m). A temperatura estrela é a combinação entre a temperatura média do ar interior e a temperatura média radiante. A temperatura de massa corresponde à temperatura média superficial dos elementos que contribuem para o armazenamento térmico (ISO 13790 2008).

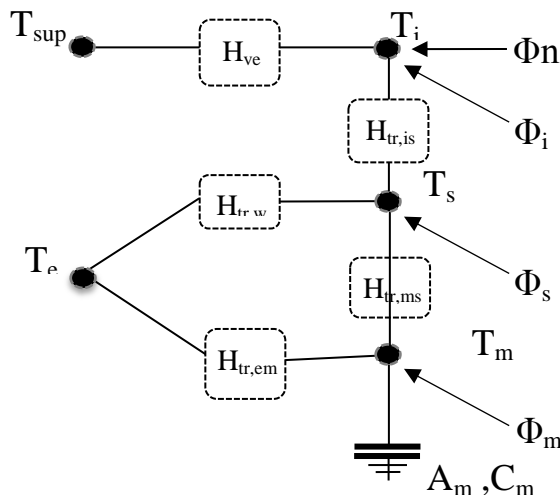


Figura 5 – Modelo 5R1C de acordo com a norma ISO 13790:2008

Neste modelo as características do edifício são definidas por um padrão em função de:

- Zona climática: paredes, teto, chão, janelas, radiação solar, etc;
- Relação janela-parede e inércia térmica;
- Tipo de operação: taxa de renovação de ar, densidade de iluminação;

A partir do edifício existente, algumas características devem adquiridas de modo a calcular as necessidades de aquecimento e arrefecimento:

- Área de pavimento, volume e área exterior total;
- Uso de padrões de ocupação, iluminação e equipamentos.

Na Figura 6 constam as particularidades para a determinação do IEE e IEE_{ref} a partir do cálculo dinâmico simplificado.

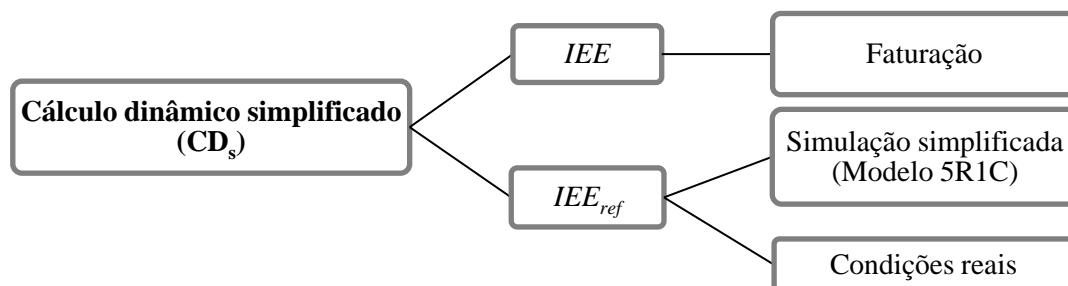


Figura 6 - Síntese da obtenção do IEE e IEE_{ref} a partir do cálculo dinâmico simplificado

O método horário simplificado foi construído numa folha de cálculo da *Microsoft Office*. Nesta folha de cálculo estão considerados todos os parâmetros do modelo 5R1C.

Tal como o método apresentado em 3.2, a classe energética é obtida a partir dos valores de R , ou seja, do IEE_s determinada a partir do consumo efetivo do edifício e do IEE_{ref} a partir do cálculo com o modelo 5R1C.

4. Caso de Estudo - Edifício Solar XXI

O Edifício Solar XXI foi construído com o intuito de ser um edifício de serviços com um baixo consumo de energia, integrando energia renováveis, como o solar térmico e o fotovoltaico e também tecnologias passivas de arrefecimento e aquecimento.

O edifício foi construído de forma a potenciar o uso dessas energias, com a integração de algumas estratégias (Laboratório Nacional de Energia e Geologia 2010):

- Otimização térmica da envolvente do edifício;
- Maior área de captação de ganhos solares;
- Aplicação de sombreamento exterior na fachada sul;
- Introdução de painéis fotovoltaicos na fachada sul;
- Recuperação do calor da fachada fotovoltaico por convecção natural;
- Coletores solares para aquecimento no interior do edifício;
- Utilização de tubos enterrados para arrefecimento passivo;
- Dar prioridade à iluminação natural.

4.1 Localização e clima

O edifício em estudo localiza-se na região e concelho de Lisboa, na freguesia do Lumiar. É um edifício de serviços com três pisos. A área total de pavimento é de 1 542 m² (Figura 7).



Figura 7 – Edifício Solar XXI

De acordo com o RCCTE, a caracterização energética do edifício é feita com a divisão do país em três zonas climáticas de Verão (V₁, V₂, V₃) e em três zonas climáticas de Inverno (I₁, I₂, I₃). No anexo III do RCCTE são definidas para cada zona diversos dados climáticos: duração da estação de aquecimento, temperatura exterior de projeto de verão e amplitude térmica média diária do mês mais quente e o número de graus-dia de aquecimento. Os dados e as respectivas zonas climáticas para o concelho de Lisboa encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6- Zonas e dados climáticos de referência para o concelho de Lisboa

	Zona climática de inverno	Número de graus-dia (°Cdia)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de verão	Temperatura exterior de projeto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Solar XXI	I ₁	1 190	5,3	V ₂	32	11

Para a simulação do Edifício Solar XXI, foram utilizados os dados climáticos do concelho de Lisboa para um ano típico de referência, construído com base em parâmetros climáticos conhecidos e registados no *software Design Builder*.

4.2 Modelo

Ao elaborar o modelo geométrico e construtivo do edifício foram respeitadas as dimensões, medidas em planta, das fachadas, pavimentos, cobertura e vãos interiores. As dimensões das divisões interiores que delimitam os espaços de cada piso foram tidas em consideração para a divisão do edifício em zonas térmicas, espaços que têm à partida condições análogas. Esta simplificação não interfere significativamente nos resultados da simulação dinâmica térmica. Trata-se de um procedimento necessário, pois reduz consideravelmente o tempo de simulação. A Figura 8 apresenta a envolvente exterior do modelo de simulação obtido pelo *software Design builder*.

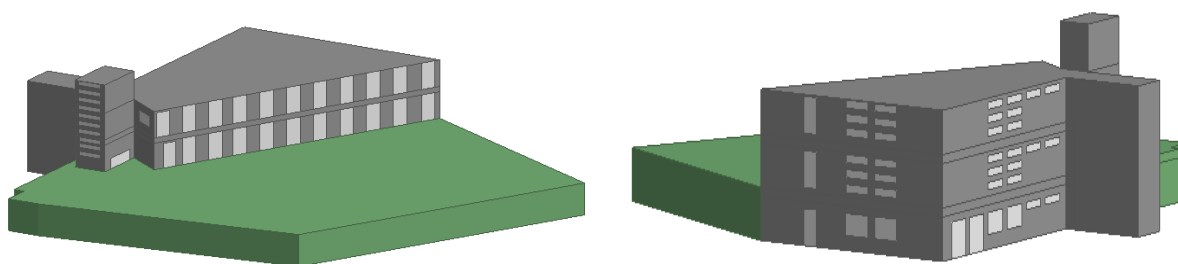


Figura 8 - Modelo do edifício Solar XXI no *software Design builder*

Tal como tinha sido referido anteriormente, o Edifício Solar XXI é um edifício de serviços com três pisos. Apresenta uma distribuição dos espaços interiores onde as salas de ocupação permanente se localizam na frente orientada a Sul, de forma a tirar partido da insolação direta e promover ganhos de calor no Inverno. As zonas localizadas a norte são ocupadas por espaços laboratoriais e salas de grupo onde a ocupação não é permanente. Na zona central do edifício encontra-se um espaço de circulação e distribuição servido de uma ampla claraboia que ilumina os três pisos. Os três pisos são similares em área útil de pavimento(LNEG).

4.3 Características construtivas

Em termos construtivos é um edifício constituído por paredes simples de alvenaria de tijolo, isoladas pelo exterior (poliestireno expandido) (Tabela 7).

Tabela 7 - Constituição e propriedades das paredes exteriores do Edifício Solar XXI

Materiais	Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	R_{elemento} ($\text{m}^2\text{K W}^{-1}$)	U ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Reboco	0,02	1,3	0,02	0,45
Alvenaria	0,22	-	0,52	
Isolamento térmico	0,06	0,04	1,50	
Argamassa	0,02	1,3	0,02	
Reboco	0,01	1,3	0,01	
Total	0,33		2,06	

As paredes interiores do edifício são constituídas por três materiais (Reboco, Alvenaria, Reboco) com espessuras, 0,02, 0,15, 0,02 metros, respetivamente. Apresentam, na sua totalidade, um coeficiente de transmissão térmica de $1,47 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

As características dos diversos pavimentos do edifício em estudo estão representadas nas tabelas que se seguem (Tabela 8 e Tabela 9).

Tabela 8 - Constituição e propriedades do pavimento térreo do Edifício Solar XXI

Piso	Materiais	Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	R_{elemento} ($\text{m}^2\text{K W}^{-1}$)	U ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Piso -1 (Térreo)	Linóleo	0,02	0,17	0,12	0,46
	Laje maciça	0,20	2,50	0,08	
	Camada de forma	0,13	0,25	0,52	
	EPS (isolamento térmico)	0,05	0,04	1,25	
Total		0,40		1,97	

Tabela 9 - Constituição e propriedades do pavimento interior (piso 0 e 1) do Edifício Solar XXI

Piso	Materiais	Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	R_{elemento} ($\text{m}^2\text{K W}^{-1}$)	U ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Piso 0 e Piso 1	Linóleo	0,02	0,17	0,12	1,08
	Laje maciça	0,20	2,50	0,08	
	Camada de forma	0,13	0,25	0,52	
Total		0,35		0,72	

A cobertura do edifício é composta por diversos materiais entre os quais lajes de betão, isolamento térmico e camada de forma. Esta apresenta cerca de 0,7 m de espessura e um coeficiente de transmissão térmica de $0,26 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

4.4 Ocupação

Assume-se como horário de funcionamento do edifício o período das 9h00 até as 18h00, com intervalo de almoço entre as 12h00 e as 14h00. O edifício encontra-se encerrado aos fins de semana.

Para o cálculo das densidades ocupacionais das diferentes zonas térmicas (Tabela 10) foi feito um levantamento do número de ocupantes por cada zona térmica do edifício.

Tabela 10 - Densidade de ocupação nas zonas térmicas do Solar XXI

Piso	Zona térmica	Área (m^2)	Ocupação	Densidade de ocupação (m^2/pessoa)
-1	0.08	83,15	2	41,58
0	1.02	16,75	1	16,75
	1.03	16,69	1	16,69
	1.04	16,62	1	16,62
	1.05	16,80	1	16,80
	1.06	56,97	2	28,48
	1.07	80,68	5	16,14
1	2.02	16,80	1	16,80
	2.04	16,80	1	16,80
	2.05	16,80	1	16,80
	2.07	81,40	6	13,57

Os valores apresentados na Tabela 10 foram os utilizados na simulação dinâmica.

4.5 Iluminação e Equipamentos

As densidades de potência de iluminação e equipamentos e respetivos tempos de utilização constam na Tabela 11.

Tabela 11 – Densidades de potência de iluminação e equipamentos do Solar XXI

Zona térmica		Densidade de iluminação (W/m ²)	Tempo (h)	Densidade de equipamentos (W/m ²)	Tempo (h)
Piso -1	0.01	9	0,25	-	-
	0.02	8	0,25	-	-
	0.03	8	0,25	-	-
	0.04	8	0,5	-	-
	0.05-0.06	5	2,75	1	24
	0.07	6	4	1	24
	0.08	8	4	1	24
	WC H	11	2	-	-
	WC M	7	4	-	-
	WC D	7	0,5	-	-
	Circulação	4	5	-	-
Piso 0	1.01	14	2	-	-
	1.02	15	1,2	15	7
	1.03	17	1,2	15	7
	1.04	17	1,2	12	7
	1.05	13	1	24	7
	1.06	11	1	13	7
	1.07	6	2	8	7
	WC H	11	2	-	-
	WC M	8	4	-	-
	WC D	10	0,5	-	-
	Circulação	3	1,5	1	24
	Bastidor Rede	-	2	18	24
Piso 1	2.01	6	0,5	-	-
	2.02	13	1	15	7
	2.03	13	2,5	7	8,5
	2.04	13	0,1	-	-
	2.05	13	1	15	7
	2.06	10	2	6	8
	2.07	6	2	26	7
	2.08	7	0,25	-	-
	WC H	11	2	-	-
	WC M	8	4	-	-
	WC D	10	0,5	-	-
	Circulação	3	1,5	1	24

4.6 Sistema de Aquecimento e Arrefecimento

A excelente captação solar aliada ao bom isolamento da envolvente promove boas condições de conforto térmico, no entanto, é necessário recorrer a outros sistemas de aquecimento em períodos de ausência prolongada de sol.

Deste modo, o Edifício Solar XXI privilegia a utilização sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento. Durante o inverno, o edifício, para o aquecimento recorre à recuperação do calor produzido pelos painéis fotovoltaicos. Esta recuperação é realizada por duas aberturas, uma inferior e outra superior, localizadas nas paredes exteriores das salas permitindo, assim, a circulação do ar. Nos períodos de meia estação, primavera e outono, o sistema funciona como pré-aquecedor do ar novo, ou seja, dá-se a admissão de ar do exterior, pelo orifício de comunicação entre os módulos e o exterior, este aquece, por convecção natural quando se encontra no espaço contíguo ao painel, ascende e é insuflado no interior da sala.

A diminuição da temperatura nos painéis, conseguida através deste sistema, permite aumentar a eficiência destes, já que, a eficiência de funcionamento dos painéis é melhorada pela diminuição da sua temperatura.

Apesar deste sistema ser eficaz, há a necessidade de recorrer a energia auxiliar. Esta energia é garantida por um sistema de convetores a água quente fornecida por uma caldeira (COP 0,87) que, por sua vez, é assistida por coletores solares existentes na cobertura do edifício. Este sistema é constituído por oito coletores planos do tipo CPC (Concentrador Parabólico Composto) (Figura 9) instalados com uma inclinação de 50° orientados a Sul.



Figura 9 – Coletores solares térmicos CPC do Edifício Solar XXI

A água quente daqui proveniente é armazenada num depósito solar, localizado no piso térreo, que alimenta posteriormente o depósito de acumulação, onde é introduzida a energia fornecida pela caldeira. O sistema é utilizado no aquecimento do ar ambiente, por encaminhamento para o sistema de radiadores localizados nos compartimentos de presença permanente. A caldeira é de ferro fundido, de alto rendimento, a gás natural e de ignição eletrónica, que é acionada sempre que for necessário repor a temperatura do depósito. A Figura 10 representa os radiadores e a caldeira a gás que compõe o sistema de aquecimento auxiliar do edifício.



Figura 10 – Sistema de aquecimento do Solar XXI a) Radiadores b) Caldeira a gás

O arrefecimento do ar interior no edifício, no período de verão, é conseguido naturalmente pela conjugação de um conjunto de estratégias como o sombreamento dos vãos envidraçados, o recurso a ventilação natural e um sistema de tubos enterrados. Os ganhos solares são minimizados pela presença de estores exteriores de alta refletividade nos vãos envidraçados, controlados pelo utilizador. Em cada gabinete, existem “bandeiras” laminares reguláveis, na parte superior de todos os vãos interiores e do poço central de iluminação que permitem uma ventilação transversal e ascensional, por efeito chaminé, já que no topo do poço existem aberturas motorizadas.

Outro sistema passivo, utilizado para arrefecimento do edifício, é o sistema de tubos enterrados (Figura 11). Este sistema permite a entrada de ar arrefecido no solo para o interior do edifício, já que no verão enquanto a temperatura do ar exterior ronda os 30°C a temperatura do solo permanece nos 16°C a 18°C, revelando-se assim uma fonte fria passível de ser aproveitada.



Figura 11 – Sistema de tubos enterrados no Edifício Solar XXI

4.7 Produção de energia elétrica: Painéis Fotovoltaicos

O sistema solar fotovoltaico encontra-se integrado arquitetonicamente na fachada sul do edifício, com módulos fotovoltaicos de silício multi-cristalino, totalizando cerca de 12 kWp para fornecimento direto de energia elétrica ao edifício. A integração destes módulos foi feita de forma a proporcionar o aproveitamento térmico do calor gerado pelos módulos fotovoltaicos para o período de inverno. No parque de estacionamento do edifício foi implementado outro sistema fotovoltaico, mas este de 6 kWp, fornecendo, também, energia elétrica ao edifício (Figura 12).

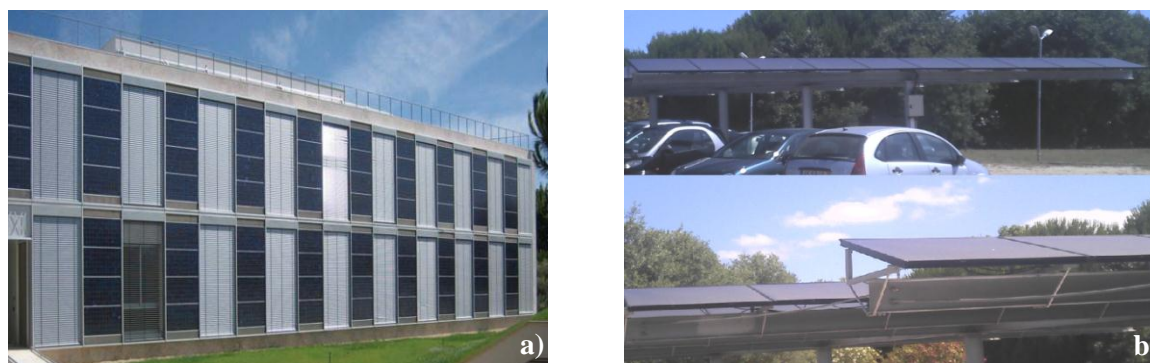


Figura 12 – Sistema fotovoltaico do Edifício Solar XXI: a) Fachada sul b) Parque estacionamento

O sistema fotovoltaico na fachada sul é constituído por 76 módulos *BP 3160*, com uma potência de pico de 12,16 kWp e com uma tensão de circuito aberto (V_{oc}^1) de 448 V. Os módulos têm uma inclinação de 90°, ou seja, estão paralelos à fachada do edifício, e têm uma área total de 95,6 m². Todos os módulos da fachada são de silício multi-cristalino.

¹ Valor da tensão, em unidade volt, para o qual a corrente é nula.

O parque de estacionamento é formado por duas “filas” de módulos fotovoltaicos. A fila 1 tem 100 módulos *Kaneka GEA60* (silício amorfo²), com uma potência de pico de 6,00 kWp numa área total de 95 m². A fila 2 tem 147 módulos *Shuco SPV 80-TF* (CIS³), numa potência de pico de 11,76 kWp. A área total de módulos nesta fila é de 107,9 m². Os sistemas do parque de estacionamento têm uma inclinação de 15° e uma tensão de circuito aberto de 503 V. A produção de energia elétrica das três zonas de módulos está representada na Tabela 12.

Tabela 12 – Energia elétrica anual produzida pelos sistemas fotovoltaicos do Edifício Solar XXI

Ano	Silício amorfo, a-Si (kWh)	Silício multi-cristalino, m-Si (kWh)	CIS (CuInSe ₂) (kWh)	Total PV (kWh)
2009	8 040	10 547	0	18 587
2010	7 303	9 557	1 951	18 811
2011	7 646	10 603	19 709	37 958

A produção de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos, em termos de energia primária, é de 7,50 kgep ano⁻¹ para o ano de 2011.

4.8 Simulação detalhada

O *software* utilizado para a criação dos modelos de simulação foi o *Design builder*. Para as simulações dinâmicas, com fim à obtenção do indicador de eficiência energética, o RSECE veio tornar obrigatória a utilização de *software* acreditado pela norma ASHRAE 140-2004. O *EnergyPlus* é um dos *softwares* acreditados.

O *Energy Plus* é um *software* lançado em 2001 servindo com o propósito de auxiliar os arquitetos e engenheiros na análise das cargas térmicas de um edifício. Este programa simula em intervalos de tempo definidos pelo utilizador, o comportamento térmico do edifício e de todos os sistemas associados. Os cálculos associados a este programa são efetuados a partir do balanço de energia e massa. Este método descreve que a massa de ar existente em cada zona térmica pode ser simulada como perfeitamente misturada, considerando, assim, que a temperatura interior de cada zona é uniforme. Além disto, o modelo do balanço térmico considera que as componentes horizontais e verticais da envolvente interior e exterior têm temperaturas e irradiação uniformes e uma condução térmica unidimensional(2012).

A equação (13) traduz o balanço térmico do ar(2012):

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_z} m_i c_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} c_p (T_{inf} - T_z) + \dot{Q}_{sistema} \quad (13)$$

sendo $C_z \frac{dT_z}{dt}$ a energia armazenada no ar (kWh), $\sum_{i=1}^{N_{si}} Q_i$ é o somatório dos ganhos internos

convectivos (W), $\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ calor convectivo transferido pelas zonas térmicas (W),

$\sum_{i=1}^{N_z} m_i c_p (T_{zi} - T_z)$ trocas de calor por mistura de ar entre zonas (W), $m_{inf} c_p (T_{inf} - T_z)$ as trocas de calor por infiltração de ar exterior (W) e $\dot{Q}_{sistema}$ a carga térmica de AVAC em cada zona térmica (W).

² Forma alotrópica não cristalina do silício podendo ser depositado a baixas temperaturas na forma de películas finas sobre uma variedade de substratos.

³ Célula solar constituída por cobre, índio e selênio Edoff, M. (2004). Thin film solar cells based on CIS - Research for production of cheap and efficient solar modules. Suécia, Uppsala University.

O *Design builder* é uma interface do *EnergyPlus*, sendo assim o programa mais usado para simulações com fim à determinação de consumos energéticos.

O programa (*Design builder*) permite a visualização de edifícios em 3D, o que facilita uma construção mais detalhada do modelo (Natural Works 2012). Os dados introduzidos no programa para se poder proceder à simulação vão desde a densidade ocupacional, a densidade de potência dos equipamentos, a potência dos sistemas de aquecimento e arrefecimento (Figura 13) até ao material construtivo das paredes, janelas, entre outras.

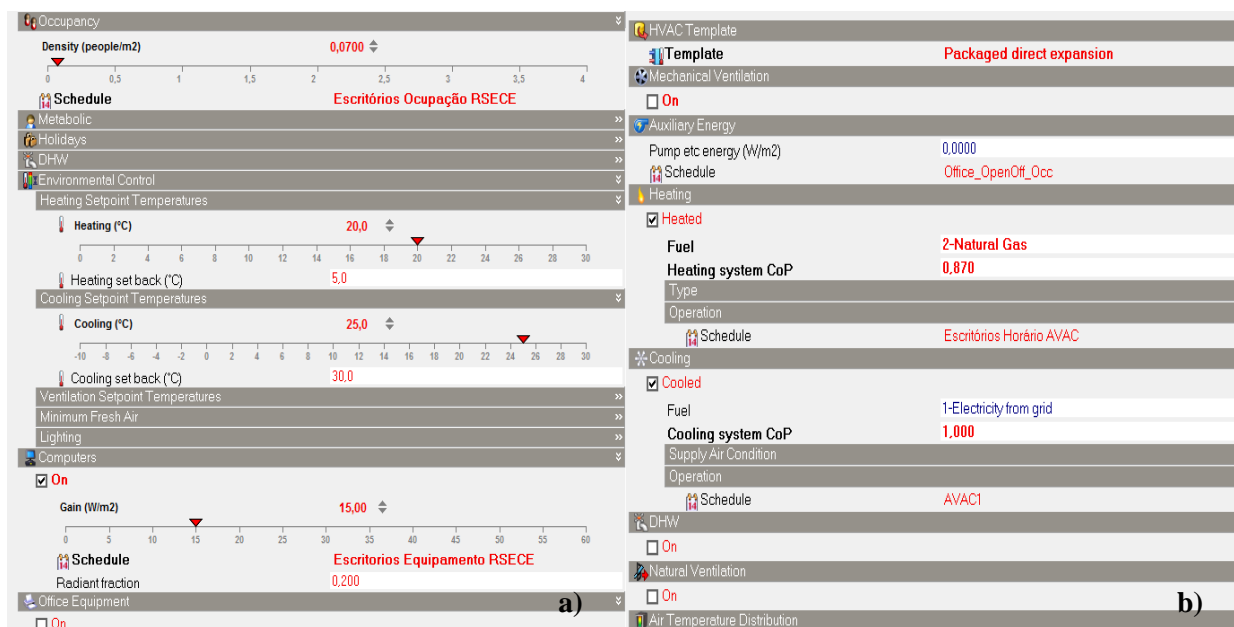


Figura 13 –Design Builder - a) Definição das densidades de ocupação e equipamentos; b) definição do sistema de climatização

O *Design Builder* dá, como output, informação sobre as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, o consumo de equipamentos e iluminação do edifício, os ganhos solares em cada zona térmica, entre outros. Todos estes dados nos permitem ter uma ideia do comportamento térmico/energético do edifício em estudo.

4.8.1 Simulação em condições reais

4.8.1.1 Fatura e consumos de energia reais

O valor do consumo total de energia elétrica do edifício considerado para a calibração resulta da média dos consumos elétricos de três anos (Decreto-Lei n.º 79/2006 2006). Tal facto deve-se à variabilidade climática que influencia os consumos de energia de ano para ano.

Os consumos de energia elétrica dos últimos três anos constam na Tabela 13.

Tabela 13 – Consumo de energia elétrica anual para o Edifício Solar XXI

Ano	Energia	Consumo de energia	
		(kWh ano ⁻¹)	(kgep ano ⁻¹)
2009	Elétrica	33 264,17	9 646,61
2010		41 286,21	11 973,00
2011		36 202,36	10 498,69
Média		36 917,58	10 706,10

4.8.1.2 Calibração do modelo

A calibração do modelo de simulação consiste na aproximação dos resultados de consumo de energia obtidos em simulação com os observados nas faturas energéticas. O valor do consumo total de energia obtido em simulação (situação de calibração) não deve ter um desvio superior a 10 % do valor de energia real das faturas. Só se pode dizer que o modelo se encontra calibrado, ou seja, que traduz credivelmente o desempenho energético do edifício se cumprir esta imposição.

4.8.1.3 Resultados das simulações em condições reais

Em condições reais, após simulação dinâmica do edifício em estudo, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Consumo de energia do Edifício Solar XXI em condições reais de utilização

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia
		(kWh ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	5 129
Equipamento		28 500
Total		33 629

Após a análise dos resultados, verifica-se que o desvio entre a energia elétrica consumida, em condições reais de utilização, apenas difere em 9 % do consumo registado na faturação elétrica do edifício. Assim, a calibração encontra-se feita e com um desvio inferior a 10 %.

Nestas condições, o setor dos equipamentos representa 65 % do consumo total de energia elétrica do Edifício Solar XXI.

4.8.2 Simulação em condições de referência

4.8.2.1 Simulação sem sistemas de AVAC

O estudo para o novo RSECE prevê a distinção entre edifícios passivos/híbridos e convencionais, tendo como critério a percentagem de horas em período de funcionamento em que o edifício esteja fora de um intervalo de temperaturas. As temperaturas impostas nesse intervalo são 19 e 27 °C, ou seja, só contam as horas em que a temperatura do ar seja inferior a 19 °C ou superior a 27 °C.

Esta fase do estudo tem como finalidade a determinação das temperaturas de *set-point* para a simulação dinâmica em condições reais e o uso ou não de sistemas de aquecimento/arrefecimento no edifício de referência (Figura 14).

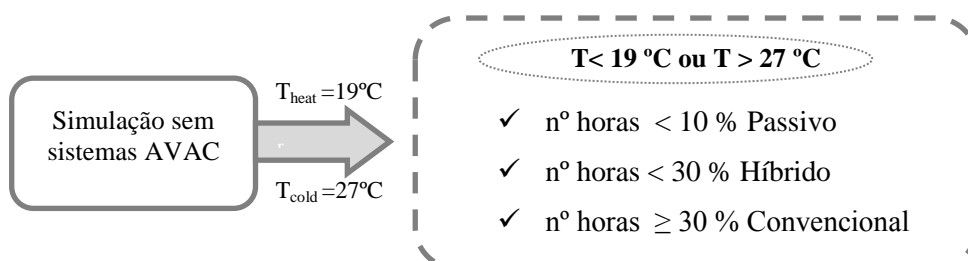


Figura 14 – Método para a determinação da categoria de edifício passivo, híbrido ou convencional

A obtenção do número de horas pertencentes, ou não, ao intervalo definido é feita a partir de uma simulação dinâmica no *Design builder* sem qualquer tipo de sistema de climatização dos espaços.

A Figura 15 ilustra o perfil anual das temperaturas, considerando os perfis reais de utilização e as temperaturas de *set-point* de 19 °C (aquecimento) e 27 °C (arrefecimento).

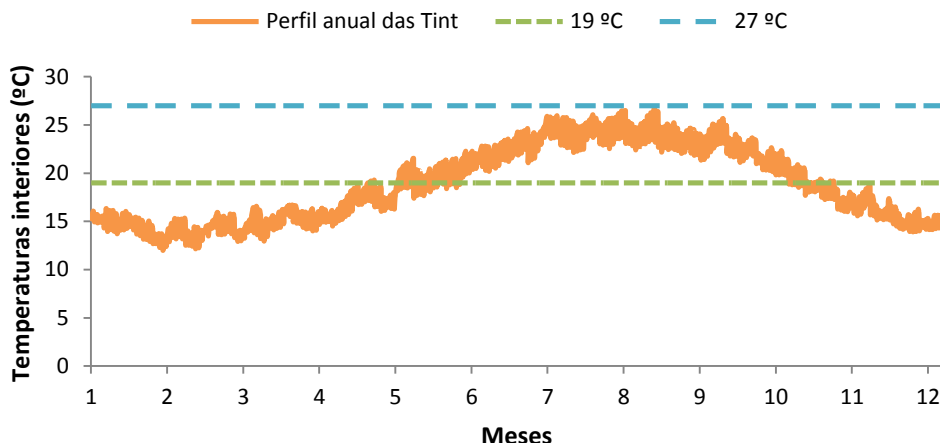


Figura 15 – Perfil anual das temperaturas interiores do piso -1 do Solar XXI

Após a análise dos dados obtidos por simulação do perfil anual das temperaturas do piso -1 do Solar XXI verifica-se que cerca de 52 % das horas ocupadas a temperatura interior é inferior a 19 °C. Essa percentagem de horas corresponde maioritariamente aos meses de inverno. A temperatura média para este piso é de 19,2 °C.

O piso 1 tem temperaturas fora do intervalo em estudo em 49 % das horas ocupadas. Porém, ao contrário do piso -1, que se encontra “enterrado”, o piso 1 tem temperaturas interiores superiores a 27 °C. A Figura 16 ilustra o perfil anual das temperaturas interiores para o piso 1.

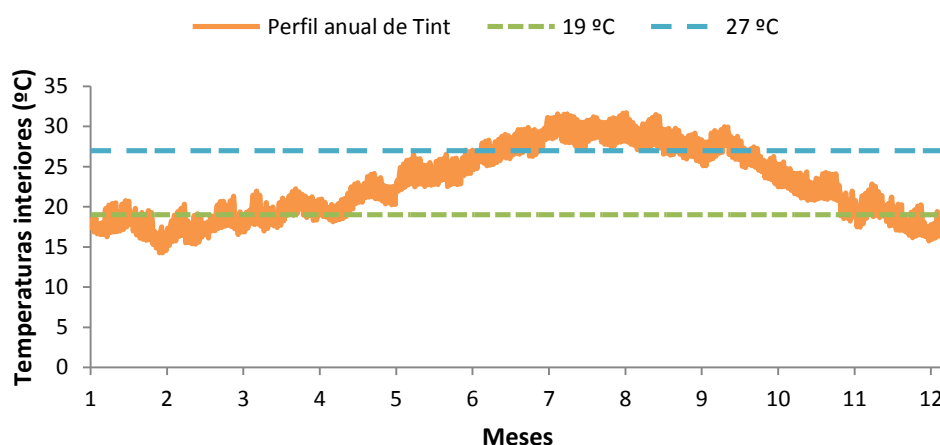


Figura 16 – Perfil anual das temperaturas interiores do piso 1 do Solar XXI

Assim, segundo a classificação adotada, o Edifício Solar XXI seria um **edifício convencional** uma vez que em aproximadamente 50 % das horas de ocupação as temperaturas interiores do ar se encontram fora do intervalo [19 °C,27 °C]. No entanto, é de salientar que as simulações efetuadas não consideraram o recurso à recuperação de calor nos painéis solares fotovoltaicos e a utilização do ar arrefecido nos tubos enterrados.

Deste modo, as temperaturas de *set-point* utilizadas na simulação em condições reais são, para aquecimento, 20 °C e para arrefecimento, 25 °C. Para o edifício de referência consideramos que este tem um sistema de arrefecimento (máquina frigorífica COP=2,7).

4.8.2.2 Edifício de referência

O edifício de referência tem de ter em conta os requisitos mínimos representados na Figura 3. O Solar XXI, com as características de um edifício de referência altera os seus consumos reais. A energia consumida em iluminação, equipamentos e climatização constam na Tabela 15.

Tabela 15 – Consumos energéticos para o Edifício Solar XXI em condições de referência

Utilização	Fonte de energia	Consumo de Energia (kWh ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	14 469,95
Equipamentos		27 613,25
Arrefecimento		5 507,69
Aquecimento	Gás	22 493,17
Total		70 084,06

O IEE_{ref} é obtido a partir da equação (8).

Assim, tem-se que o valor de IEE_{ref} é de 96,74 kWh m⁻²ano⁻¹ com um $IEE_{s,ref}$ de 49,53 kWh m⁻²ano⁻¹.

4.8.3 Aplicação do RSECE (revisão)

O novo Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (ainda em estudo) prevê um novo método para o cálculo do indicador de eficiência energética (IEE). Este método é mais simples e acessível, tornando a tarefa da análise do desempenho energético do edifício mais facilitada. O método utilizado está descrito em 3.2.

O futuro regulamento não tem em conta fatores como o fator de forma, as correções climáticas que, no presente regulamento influenciam o cálculo do IEE_{nom} do edifício.

Assim, para o Edifício Solar XXI, tendo em consideração o valor do $IEE_{s,ref}$ obtido em 4.8.2, tem-se a seguinte classe energética:

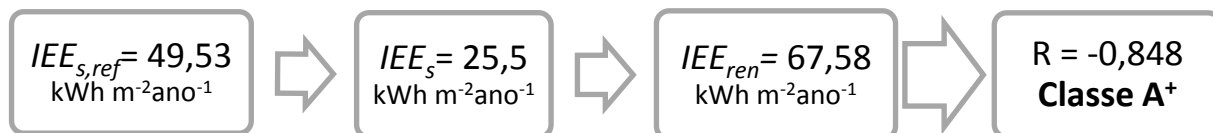


Figura 17 – Indicadores de eficiência energética e classe energética do Edifício Solar XXI obtidos pelo SD_{reais}

4.8.4 Aplicação do RSECE (2006)

4.8.4.1 Perfis de utilização

Os padrões nominais de utilização são definidos por tipologia, variando os perfis. Para este caso de estudo considerou-se escritórios e as condições representadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Condições nominais definidas pelo RSECE

Escritórios	
	Densidades
Ocupação	15 m ² ocupante ⁻¹
Equipamento	15 W m ⁻²
Iluminação	-

Os perfis de iluminação, equipamentos e ocupação definidos no RSECE estão representados nas três figuras seguintes.

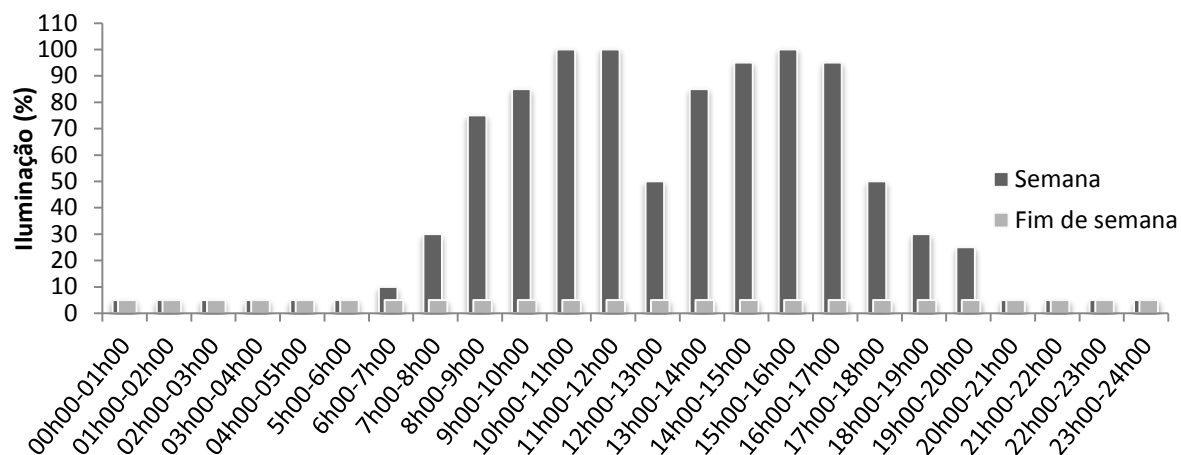


Figura 18 – Perfil horário da iluminação em condições nominais

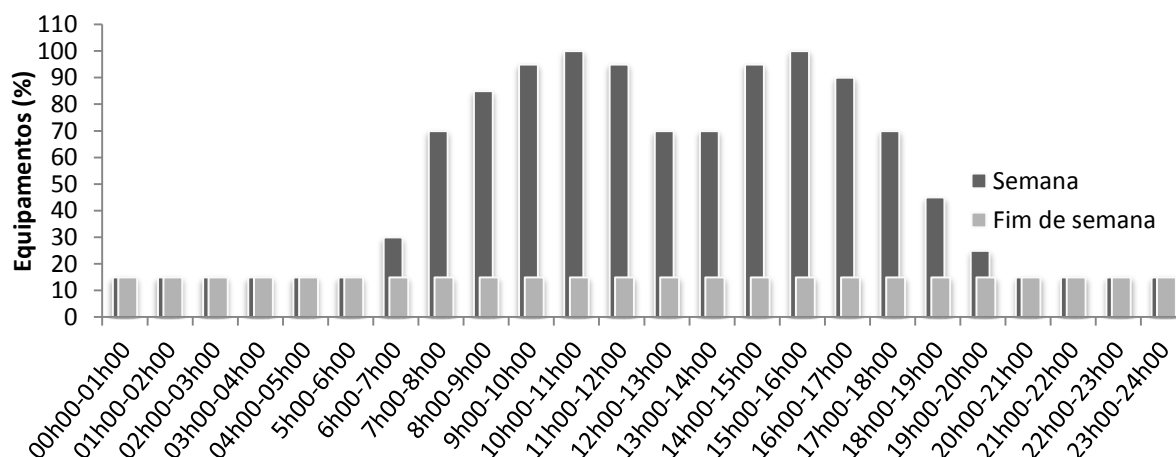


Figura 19 – Perfil horário dos equipamentos em condições nominais

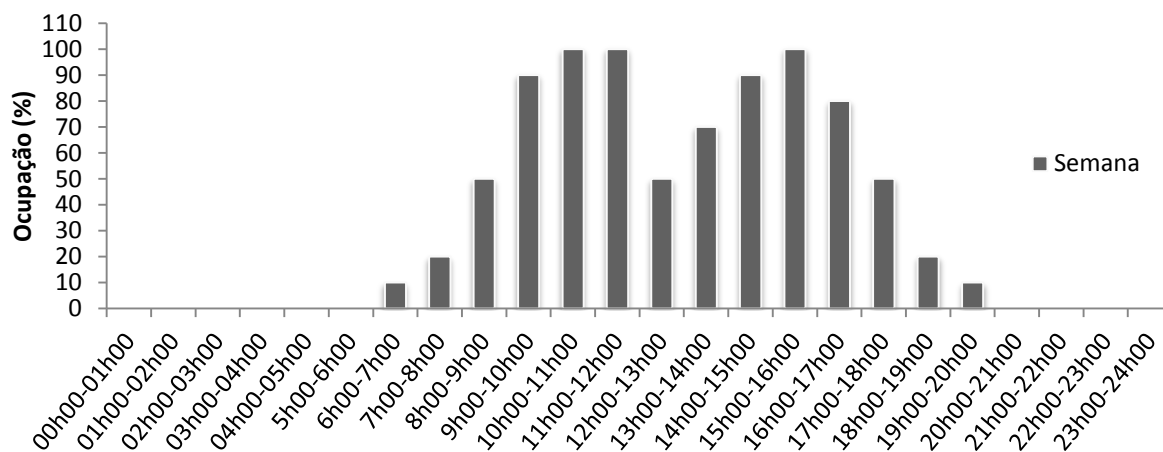


Figura 20 – Perfil horário da ocupação em condições nominais

O RSECE impõe caudais mínimos de ar novo consoante o tipo de espaço e atividade que se realiza nele. Os valores dos caudais são indicados por área ($\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$) ou por ocupante ($\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{ocupante}^{-1}$), devendo-se escolher a situação mais penalizadora. Para este caso considerou-se como tipo de atividade os serviços em gabinetes (Tabela 17).

Tabela 17 – Caudais mínimos de ar novo para o Edifício Solar XXI

Serviços	Caudais mínimos de ar novo	
	($\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{ocupante}^{-1}$)	($\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$)
Gabinetes	24	3

Após a criação do modelo construtivo com as condições impostas pelo RSECE, procede-se à simulação com fim à obtenção dos consumos energéticos do edifício nestas condições.

Na Tabela 18 encontram-se os resultados do consumo total de energia para diversas categorias, em perfil de escritórios.

Tabela 18 - Consumos de energia obtidos por simulação em condições nominais para o Solar XXI

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia	
		(kWh ano^{-1})	(kgep ano^{-1})
Iluminação	Elétrica	26 332,35	7 636,38
Equipamentos		59 027,08	17 117,85
Arrefecimento		15 943,60	120,23
Aquecimento	Gás	1 397,99	4 623,64
Total		102 701,02	29 498,11

4.8.4.2 Determinação do indicador de eficiência energética

Com uma área de envolvente exterior de $1\,258,91\text{ m}^2$, uma área de envolvente interior de $45,9\text{ m}^2$ e um volume total de $4\,000,54\text{ m}^3$, obtém-se um fator de forma de 0,29.

Assim, para o Edifício Solar XXI tem-se:

$$N_{I1} = 44\text{ kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{ (GD=1 000 }^\circ\text{C dias)}$$

$$N_{I2} = 51,50\text{ kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{ (GD=1 190 }^\circ\text{C dias)}$$

O valor máximo do limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, de acordo com o RCCTE, é de:

$$N_{V1} = 16\text{ kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{ (zona V}_1\text{ norte)}$$

$$N_{V2} = 32\text{ kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{ (zona V}_2\text{ sul)}$$

Deste modo, obtêm-se os valores dos fatores de correção climática apresentados de seguida:

$$F_{C1} = 0,854$$

$$F_{C2} = 0,5$$

Os indicadores de eficiência energética são:

$$IEE_I = 0,07\text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

$$IEE_V = 1,58\text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

$$IEE_{nom} = 18,58 \text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

Porém, uma vez que o Edifício Solar XXI tem produção de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, o IEE_{nom} , para uma produção de $7,5 \text{ kgep ano}^{-1}$, é de $11,08 \text{ kgep m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

$$IEE_{nom} = 11,08 \text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

Para o edifício em estudo, na categoria de edifícios de serviços, têm-se os seguintes valores de IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S (Tabela 19):

Tabela 19 – Valores do IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S para o edifício Solar XXI

	Valores (kgep m ² ano ⁻¹)
IEE_{nom}	11,08
$IEE_{ref,novos}$	35
S	15

Conjugando os valores da Tabela 19 é possível determinar a classe energética do edifício em estudo. Na Tabela 20 constam os valores obtidos após a verificação das condições e a respetiva classe energética.

Tabela 20 – Classe energética do Edifício Solar XXI

Classe energética	Condição a verificar
A ⁺	$11,08 \leq 23,75$
A	$23,75 < 11,08 \leq 27,5$
B	$27,5 < 11,08 \leq 31,25$
B ⁻	$31,25 < 11,08 \leq 35$
C	$35 < 11,08 \leq 42,5$
D	$42,5 < 11,08 \leq 50$
E	$50 < 11,08 \leq 57,5$
F	$57,5 < 11,08 \leq 65$
G	$65 < 11,08$

Conclui-se então, que na escala de classes de desempenho energético, definida por tipologia para edifícios de serviço, o Edifício Solar XXI pertence à **classe energética A⁺**.

4.9 Cálculo dinâmico simplificado

4.9.1 Determinação do indicador de eficiência energética- IEE

O modelo simplificado, que se encontra em estudo, determinou as necessidades energéticas do Edifício Solar XXI. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Consumo de energia obtido por CD_s para o Solar XXI

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia (kWh ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	28 392,4
Equipamentos		30 878,6
Arrefecimento		13 051,9
Aquecimento	Gás	9 348,1
Total		81 671,0

Os indicadores de eficiência energética, em kWh m⁻² ano⁻¹, no CD_s constam na Figura 21.

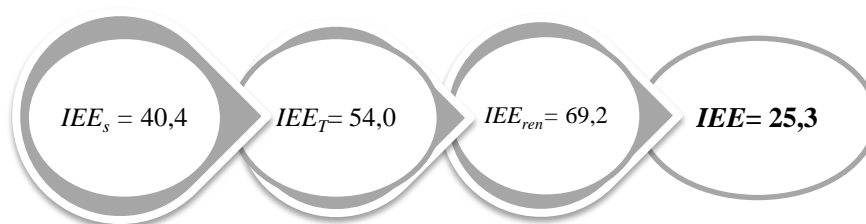


Figura 21 – Indicadores de eficiência energética do Solar XXI obtidos pelo CD_s

4.9.2 Determinação do indicador de eficiência energética de referência- IEE_{ref}

Os consumos energéticos e respetivos indicadores de eficiência, para as condições de referência encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 – Consumos energéticos e respetivos indicadores de eficiência energética

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia
		(kWh ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	28 392,4
Equipamentos		30 878,6
Arrefecimento		13 051,9
Aquecimento	Gás	9 348,1
Total		81 671,0
IEE_s		66,6
IEE_T		54,0
IEE_{ren}		0,0
IEE_{ref}		120,7

Assim, após determinar o IEE e o IEE_{ref} calcula-se o valor de R (equação (12)).

$$R = -0,43$$

O edifício através do CD_s pertence à **classe energética A⁺**.

4.10 Síntese dos resultados do Edifício Solar XXI

Em suma, como é possível verificar na Tabela 23, as metodologias aplicadas ao Edifício Solar XXI, classificam-no como pertencente à **classe energética A⁺**.

Tabela 23 – Classe energética obtida pelas diferentes metodologias para o Edifício Solar XXI

	Metodologias aplicadas		
	SD _{nominais}	SD _{reais}	CD _s
IEE_{nom}	11,08	-	-
IEE_s	-	25,50	40,40
IEE_{ren}	-	67,58	69,20
$IEE_{s,ref}$	-	49,54	66,60
R	-	-0,85	-0,43
Classe energética	A⁺	A⁺	A⁺

5. Caso de estudo - Edifício X

5.1 Localização e clima

O edifício em estudo localiza-se na região Centro e sub-região da Cova da Beira. É um edifício de serviços com três pisos e um sótão, local onde se encontram os equipamentos de climatização. A área total útil de pavimento é de $1\,291\,m^2$.

Os dados e as zonas climáticas para o concelho em estudo encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24- Zonas e dados climáticos de referência para o concelho Y

	Zona climática de inverno	Número de graus-dia (°Cdia)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de verão	Temperatura exterior de projeto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Y	I ₂	1 990	7	V ₃ , Norte	34	14

Para a simulação do edifício em estudo, foram utilizados os dados climáticos do concelho em estudo para um ano típico de referência, construído com base em parâmetros climáticos conhecidos.

5.2 Modelo

O edifício X tem $1881\,m^2$ de área total de pavimento, correspondendo $1291\,m^2$ à área útil.

O pé direito (*pd*) varia consoante o piso e a secção em estudo. No piso térreo, o pé direito é de $3\,m$; no piso 1 varia entre os 3 e $4,5\,m$ e, no piso 2 é de 3 e $4\,m$.

Ao elaborar o modelo geométrico e construtivo do edifício foram respeitadas as dimensões, medidas em planta, das fachadas, pavimentos, cobertura. As dimensões das divisões interiores que delimitam os espaços de cada piso foram tidas em consideração para a divisão do edifício em zonas térmicas, espaços que têm à partida condições análogas. Esta simplificação não interfere significativamente nos resultados da simulação dinâmica térmica. Trata-se de um procedimento necessário, pois reduz consideravelmente o tempo de simulação. A Figura 22 apresenta a envolvente exterior do modelo de simulação obtido pelo *software Design builder*.

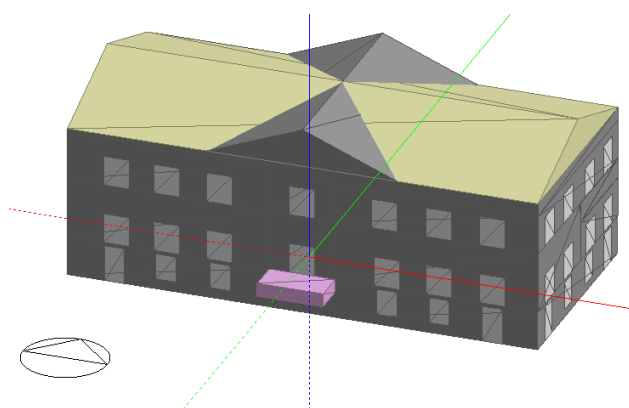


Figura 22 - Modelo do edifício no *software Design builder*

O edifício, tal como já havia sido mencionado, é constituído por três pisos. Em todos os pisos encontram-se gabinetes e salas de reuniões.

De acordo com a informação recolhida no local, existem divisões com pouca utilização, dos quais são exemplos alguns gabinetes sendo apenas utilizados em circunstâncias esporádicas. A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 correspondem às plantas dos três pisos do edifício X.

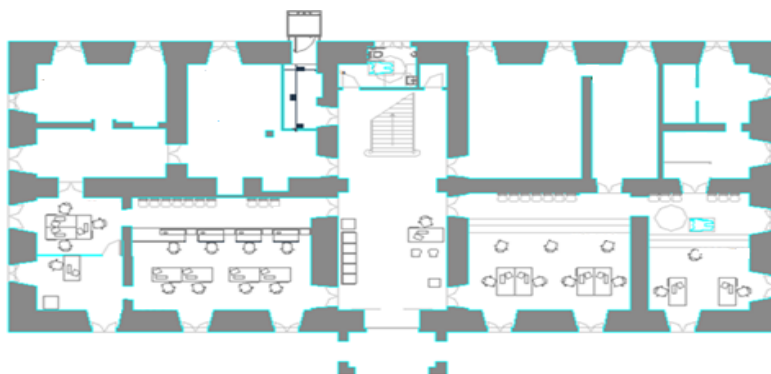


Figura 23 - Planta do edifício X (Piso Térreo)



Figura 24 – Planta do edifício X (Piso 1)

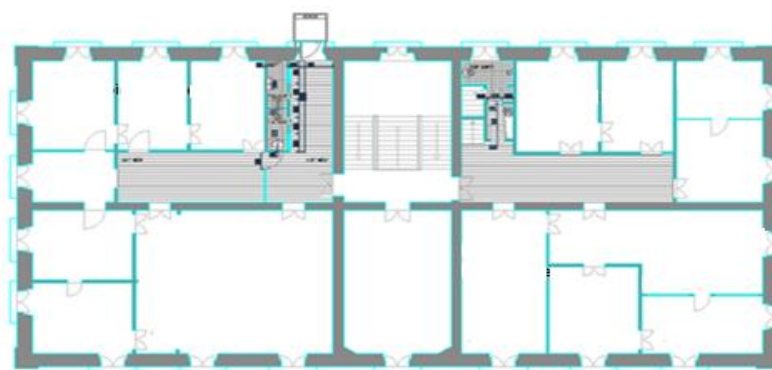


Figura 25 – Planta do edifício X (Piso 2)

Os dados das zonas térmicas do edifício X são apresentados na Tabela 25, Tabela 26 e Tabela 27.

Tabela 25 – Características das zonas térmicas do piso térreo do edifício X

Piso Térreo	Área (m ²)	Pd (m)	Caracterização do espaço	Parâmetros de utilização
Zona comum	104,05	3	Útil	<ul style="list-style-type: none"> - ocupação - iluminação - equipamentos
Gabinete	42,45			
Gabinete	40,16			
Sala de reuniões	82,66			
Zona comum	104,12			
Gabinete	61,94			
Gabinete	28,64			

Tabela 26 - Características das zonas térmicas do piso 1 do edifício X

Piso 1	Área (m²)	Pd (m)	Caracterização do espaço	Parâmetros de utilização
Sala de reuniões	68,36	4,5	Útil	- ocupação - iluminação - equipamentos
Gabinete	76,34	3,0		
Gabinete	99,43	4,5		
Gabinete	63,26	3,0		
I.S.	15,74			

Tabela 27 – Características das zonas térmicas do piso 2 do edifício X

Piso 2	Área (m ²)	Pd (m)	Caracterização do espaço	Parâmetros de utilização
Gabinete	26,77	3,0	Útil	- ocupação - iluminação - equipamentos
Gabinete	125,70			
Reprografia	34,69	3,8		
Gabinete	91,48			
Gabinete	60,98	3,0		
Zona comum	33,57	4,0		
Zona comum	36,91	3,8		

5.3 Características construtivas

A estrutura do edifício apresenta características típicas da sua época de construção tendo como base materiais maciços. As paredes, tanto as interiores com as exteriores, são em pedra (granito) com portas de madeira, à exceção da porta principal que é de alumínio.

Os vãos envidraçados possuem vidro simples incolor e caixilharia em madeira, assim como alguns dos sistemas de sombreamento utilizados em gabinetes.

Da Tabela 28 à Tabela 31 têm-se as características relevantes dos elementos construtivos adotados no modelo de simulação. Todas as informações referentes à construção foram obtidas a partir de uma auditoria feita ao edifício.

Tabela 28 – Constituição e propriedades dos elementos verticais do edifício(Moita 2010)

Elementos Verticais		Espessura (m)	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Densidade (kg m ⁻³)	R _{total} (m ² K W ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
Paredes exteriores	Reboco	0,15	0,72	920	1 650	0,669	1,495
	Granito	1,0	2,8	1 000	2 600		
	Reboco	0,15	0,72	920	1 650		
Paredes interiores	Reboco	0,15	0,72	920	1 650	0,671	1,490
	Granito	0,5	2,8	1 000	2 600		
	Reboco	0,15	0,72	920	1 650		

Tabela 29 – Constituição e propriedades dos elementos horizontais do edifício(Moita 2010)

Elementos horizontais		Espessura (m)	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Densidade (kg m ⁻³)	R _{total} (m ² K W ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
Pavimento interno	Madeira	0,025	0,14	1 200	650	0,78	1,29
	Ar	0,17	-	-	-		
	Madeira (Pinho seco)	0,2	0,17	2 120			
Pavimento térreo	Tijoleira	0,015	0,7	864	2 000	0,706	1,417
	Betonilha	0,02		993,6	1 300		
	Enrocamento	0,27		993,6	1 800		

Tabela 30 – Constituição e propriedades das portas do edifício (Moita 2010)

Elementos		Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Densidade (kg m^{-3})
Portas	Madeira Pintada	0,045	0,19	2 390	700

Tabela 31 – Propriedades do vidro utilizado nos vãos do edifício

Elementos		Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Fator solar	U_{total} ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Vidro	Simples e incolor	0,003	0,9	0,858	6,257

5.4 Ocupação

O horário de expediente dos funcionários do edifício X é das 9h00 às 17h30 com pausa para almoço das 12h30 às 14h00, encontrando-se fechado ao fim de semana.

O número de ocupantes tido em conta no modelo de simulação foi o número de funcionários que se encontravam nas suas funções aquando a auditoria. As densidades de ocupação consideradas no modelo são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Densidade de ocupação nas zonas térmicas do edifício X

Zona térmica	Piso	Densidade de ocupação ($\text{m}^2/\text{ocupante}$)
Zona comum	Térreo	9,24
Gabinete		
Arrumos		
Gabinete		
Gabinete		
Gabinete	1	13,91
Gabinete		33,14
Gabinete		11,28
Gabinete		15,27
Gabinete		15,99
Gabinete	2	15,99
Reprografia		34,69
Gabinete		7,04
Gabinete		20,04

5.5 Iluminação

Os dados apresentados da auditoria são relativos ao número, à potência e ao tipo de lâmpadas utilizado em cada zona do edifício. De acordo com o que foi verificado, a iluminação utilizada é na sua maioria lâmpadas fluorescentes. Os valores das diferentes densidades de potência de cada zona constam na Tabela 33.

Tabela 33 – Densidades de potência relativas à iluminação por zona térmica

Zona térmica	Piso	Densidade de Potência (W m ⁻²)
Sala de reuniões	Térreo	18
Gabinete		
Arrumos		
Gabinete		6
Gabinete		
Gabinete		
Sala de reuniões	1	1
Gabinete		11
Gabinete		19
Gabinete		21
Sala de reuniões		25
Zona comum		4
Gabinete	2	17
Gabinete		17
Reprografia		12
Gabinete		16
Gabinete		18
Zona comum		8

5.6 Equipamento

No modelo de simulação deste edifício utilizaram-se, tal como na iluminação, os valores das potências instaladas e o tipo de equipamentos existentes obtidos na auditoria.

Os principais equipamentos em uso eram computadores, impressoras e fotocopiadoras. No entanto, em algumas zonas existiam máquinas de café, frigorífico, televisão, entre outros equipamentos, sendo estes desprezáveis no modelo de simulação, uma vez que a sua utilização é esporádica, estando mesmo em alguns casos desligados. Na Tabela 34 constam os valores da densidade de potência dos equipamentos para cada zona térmica.

Tabela 34 - Densidades de potência relativas aos equipamentos por zona térmica

Zona térmica	Piso	Densidade de potência dos equipamentos (W m ⁻²)
Zona comum	Térreo	20
Gabinete		
Arrumos		
Gabinete		8
Gabinete		
Gabinete		
Gabinete	1	7
Gabinete		12
Gabinete		9
Sala de reuniões		0
Zona comum		26
Gabinete	2	13
Gabinete		13
Reprografia		5
Gabinete		23
Gabinete		8
Zona comum		13

5.7 Sistema AVAC

O edifício em estudo tem um sistema mecânico de ventilação ou insuflação de ar novo, porém este sistema não é utilizado de forma contínua, sendo desprezado no modelo de simulação. A ventilação natural do edifício é feita a partir da permeabilidade ao ar da envolvente.

A climatização do edifício é assegurada por equipamento do tipo VRV, ou seja, equipamento de volume de refrigerante variável. Neste caso específico é constituído por três unidades exteriores, da marca Sanyo com o modelo SPW- CR1903GDYH8. Cada unidade localiza-se num piso, sendo a potência térmica distribuída no interior do edifício através de quatro tipos de ventilo-convetores. A eficiência do sistema central (três unidades exteriores) é apresentada na Tabela 35.

Tabela 35 – Eficiência do sistema de climatização

Unidades	Três	
Função	Aquecimento	Arrefecimento
COP	2,51	2,94

As temperaturas de *set point* consideradas no modelo de simulação para calibração foram, inicialmente, de: 22 °C para a estação de aquecimento (inverno) e 23 °C para a estação de arrefecimento (verão) valores estes obtidos na auditoria.

O sistema de AVAC, no modelo de simulação em condições reais, foi apenas considerado nas zonas com ocupação.

5.8 Simulação detalhada

5.8.1 Simulação em condições reais

5.8.1.1 Fatura e consumos de energia reais

Na Tabela 36 encontram-se os valores dos consumos totais de energia relativos aos três anos e o valor médio anual. Estes valores vêm expressos em unidade de energia útil e energia primária.

Tabela 36 – Consumos de energia elétrica anuais do edifício X

Fatura	Energia	Consumo de energia	
		(kWh ano ⁻¹)	(kgep ano ⁻¹)
2008	Elétrica	159 735	46 323,15
2009		167 108	48 461,32
2010		156 443	45 368,47
Média		161 095	46 717,55

5.8.1.2 Resultados das simulações em condições reais

A simulação do edifício teve em conta os valores das densidades de potência dos equipamentos e da iluminação, da densidade ocupacional, da eficiência do sistema de climatização central e as características construtivas apresentadas nos pontos anteriores.

O edifício dispunha de sombreamento interior em diversas zonas, sendo na sua maioria de cor clara. A Tabela 37 apresenta as características do sombreamento tidas em conta no modelo de simulação.

Tabela 37 – Propriedades do sombreamento do edifício X

Sombreamento	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Transmitância	Reflectância
Shade-roll	0,1	0,30	0,25

O piso térreo deste edifício está colocado diretamente sobre o solo influenciando a temperatura interior do edifício. Deste modo, foi necessário o cálculo da temperatura do solo para aquela região. Os dados obtidos para o Solar XXI encontram-se no Anexo A.

Após a alteração no *Design builder* de todos os campos aqui referidos, procedeu-se à simulação do modelo apresentado. Os resultados obtidos, ou seja, os valores dos consumos energéticos do edifício encontram-se discriminados na Tabela 38.

Tabela 38 – Consumo de energia obtido por simulação em condições reais para o edifício X

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia	
		(kWh ano ⁻¹)	(kgep ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	24 389,10	7 072,84
Equipamento		34 593,92	10 032,23
Aquecimento		33 846,16	9 815,39
Arrefecimento		8 473,51	2 457,32
Outros		47 304,00	13 718,16
Total		148 606,68	43 095,94

Tal como no Edifício Solar XXI, os valores aqui apresentados não foram sujeitos a correção climática. Como se pode observar, o valor do consumo anual de energia obtido por simulação não difere em mais/menos de 10 % do valor da média dos consumos energéticos dos últimos três anos. O desvio para este caso é de -8 %.

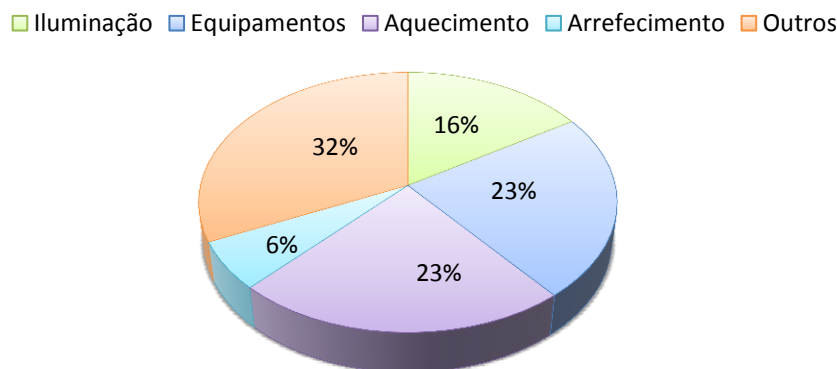


Figura 26 – Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes setores em condições reais

Em condições reais, os consumos residuais e de equipamentos permanentes apresentam a maior percentagem, seguindo-se as componentes dos equipamentos e de aquecimento com um valor de 23 %.

5.8.2 Simulação em condições de referência

A revisão do RSECE prevê que todos os edifícios sejam identificados de acordo com três categorias: passivos, híbridos e convencionais.

O edifício X encontra-se na classe dos **edifícios convencionais**, ou seja, em 72 % das horas de ocupação do edifício as temperaturas estão distribuídas fora do intervalo [19°C, 27°C]. Deste modo, procedeu-se à determinação do IEE_{ref} com temperaturas de *set-point* de 20 °C (aquecimento) e 25 °C (arrefecimento). O método de obtenção do indicador de eficiência energética de referência, para o edifício X, foi o descrito em 3.2. Os resultados conseguidos constam na Tabela 39.

Tabela 39 – Indicador de eficiência energética do edifício X de referência

Indicadores	Consumos (kWh m ⁻² ano ⁻¹)
$IEE_{s,ref}$	135,32
$IEE_{T,ref}$	158,59
$IEE_{ren,ref}$	0
IEE_{ref}	294,11

5.8.3 Aplicação do RSECE (revisão)

Os consumos de energia provenientes do edifício X em condições de consumo efetivo são os referidos na Tabela 38. Com a obtenção dos resultados calculou-se o IEE e respetiva classe energética (Tabela 40).

Tabela 40 – Indicador de eficiência energética e classe energética para o edifício X pelo SD_{reais}

Indicadores	Consumos (kWh m ⁻² ano ⁻¹)
IEE_s	129,2
IEE_T	158,6
IEE_{ren}	0
IEE	287,8
R = 0,95 → Classe B⁺	

O edifício X, através do método dinâmico multi-zona pertence à **classe energética B⁺**.

5.8.4 Aplicação do RSECE (2006)

5.8.4.1 Perfis e condições nominais

O perfil utilizado é o de escritórios, ou seja, o perfil apresentado em 4.8.4.1.

Na Tabela 41 encontram-se os resultados de consumo total para diversas categorias, em perfil de escritórios.

Tabela 41 - Consumos de energia obtidos por simulação em condições nominais para o edifício X

Utilização	Forma de energia	Consumo de energia	
		(kWh ano ⁻¹)	(kgep ano ⁻¹)
Iluminação	Elétrica	56 988,60	16 526,70
Equipamentos		79 281,76	22 991,71
Aquecimento		16 447,51	4 769,78
Arrefecimento		10 054,23	2 915,72
Total		162 772,10	47 203,91

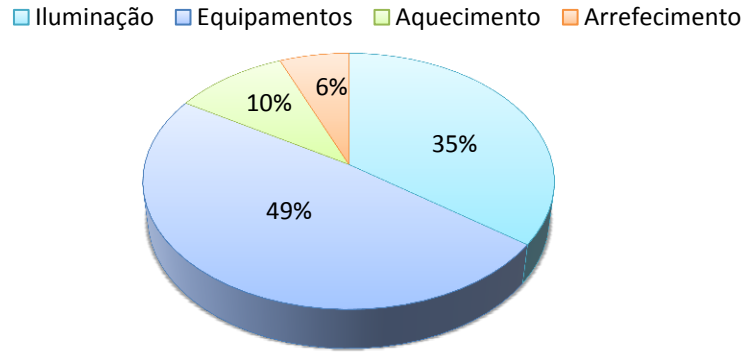


Figura 27 - Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes sectores da simulação em condições nominais

Após a análise da Figura 27 verifica-se que o maior consumo energético é nos equipamentos, representando cerca de 49 % do consumo total anual. O consumo de energia para arrefecimento é de 6 %, sendo o sector onde o consumo é menor.

5.8.4.2 Determinação do indicador de eficiência energética

Com uma área de envolvente exterior de 1 201,5 m², uma área de envolvente interior de 592,35 m² e um volume total de 4 369,87 m³, obtém-se um fator de forma de 0,40.

De acordo com RCCTE, se o fator de forma for igual ou inferior a 0,5, utiliza-se para o cálculo das necessidades nominais de energia útil, a equação (14).

$$N_i = 4,5 + 0,0395 \times GD \quad (14)$$

sendo, GD os graus-dia apresentados na Tabela 24.

Assim, para o edifício X tem-se:

$$N_{I1} = 44 \text{ kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1} \text{ (GD=1 000 } ^\circ\text{C dias)}$$

$$N_{I2} = 83 \text{ kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1} \text{ (GD=1 990 } ^\circ\text{C dias)}$$

O valor máximo limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, de acordo com o RCCTE, é de:

$$N_{V1} = 16 \text{ kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1} \text{ (zona V}_1 \text{ norte)}$$

$$N_{V2} = 26 \text{ kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1} \text{ (zona V}_2 \text{ norte)}$$

Deste modo, obtêm-se os valores dos fatores de correção climática apresentados de seguida:

$$F_{C1} = 0,53$$

$$F_{C2} = 0,62$$

Em condições nominais, os valores dos consumos de aquecimento e arrefecimento são, respetivamente, 4 769,8 e 2 915,73 kgep ano⁻¹.

Os indicadores de eficiência energética são:

$$IEE_I = 1,96 \text{ kgep m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$$

$$IEE_V = 1,40 \text{ kgep m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$$

$$IEE_{nom} = 33,97 \text{ kgep m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$$

5.8.4.3 Determinação da classe energética do edifício em estudo

Para o edifício em estudo têm-se os seguintes valores de IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S (Tabela 42):

Tabela 42 – Valores do IEE_{nom} , $IEE_{ref,novos}$ e S para o edifício X

	Valores
IEE_{nom}	33,97
$IEE_{ref,novos}$	35
S	15

Conjugando os valores da Tabela 42 é possível determinar a classe energética do edifício em estudo. Na Tabela 43 constam os valores obtidos após a verificação das condições e a respetiva classe energética.

Tabela 43 – Classe energética do edifício X

Classe energética	Condição a verificar
A ⁺	$33,97 \leq 23,75$
A	$23,75 < 33,97 \leq 27,5$
B	$27,5 < 33,97 \leq 31,25$
B ⁻	$31,25 < 33,97 \leq 35$
C	$35 < 33,97 \leq 42,5$
D	$42,5 < 33,97 \leq 50$
E	$50 < 33,97 \leq 57,5$
F	$57,5 < 33,97 \leq 65$
G	$65 < 33,97$

Conclui-se então, que na escala de classes de desempenho energético, definida por tipologia para edifícios de serviço, o edifício X pertence à **classe B⁻**.

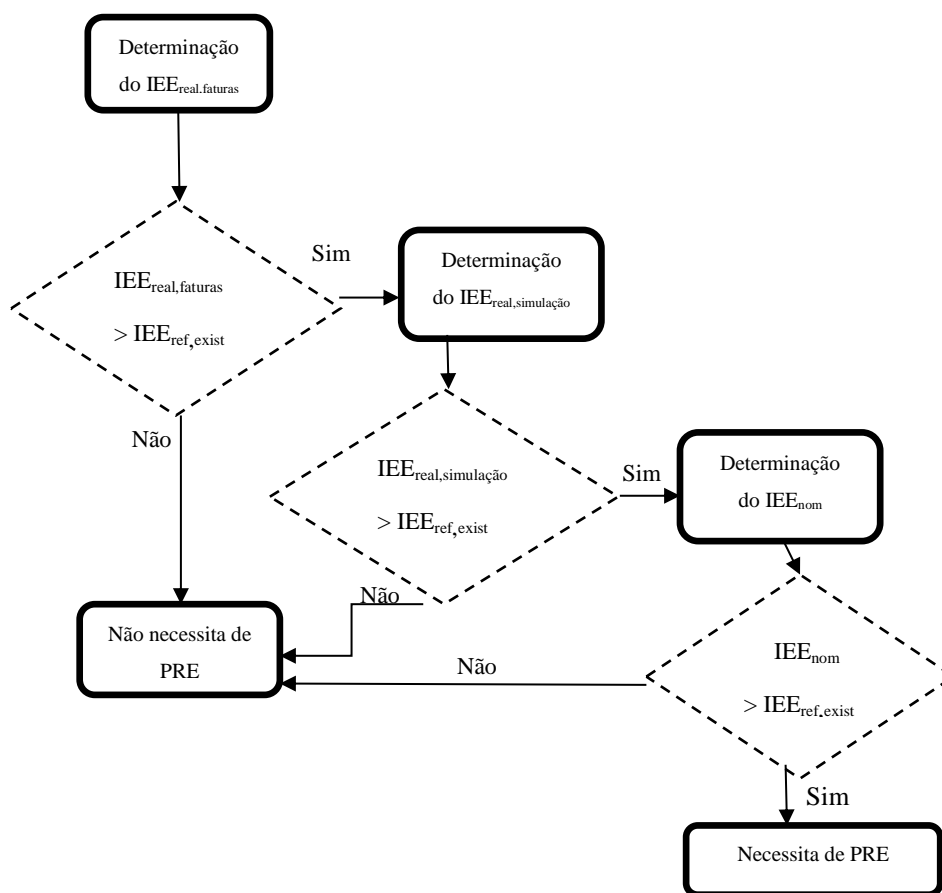
5.8.5 Simulação dinâmica após medidas de racionalização energética

5.8.5.1 Plano de racionalização de energia aplicado ao edifício em estudo

O Plano de Racionalização Energética (PRE) é um conjunto de medidas de racionalização energética, para a redução de consumos ou de custos de energia, elaborado na sequência de uma auditoria energética, organizado e seriado com base na sua exequibilidade e da sua viabilidade económica (ADENE 2008).

A obrigatoriedade de elaborar, submeter à DGEG e implementar um PRE surge como consequência de auditoria em que se verifica que o valor de IEE do edifício é superior ao respetivo valor limite aplicável. As medidas que constem no PRE que tenham um período de retorno simples inferior a 8 anos, determinado para condições reais de funcionamento do edifício, são de execução obrigatória num prazo até 3 anos após a data de emissão do certificado energético.

O método para verificar se o IEE do edifício é superior ao valor limite é demonstrado na Figura 28.



Após se determinar que é necessário um PRE, estuda-se as medidas de racionalização energética a propor com efeito na redução dos consumos energéticos do edifício.

O IEE_{MRE} é o indicador de eficiência energético calculado a partir dos resultados obtidos por simulação energética. Esta simulação tem em consideração as medidas de racionalização apresentadas no PRE.

A simulação dinâmica do edifício para o cálculo do IEE_{MRE} é feita em condições nominais. Deste modo, medidas como a regulação dos “set-point” das unidades de climatização e a alteração do perfil de utilização dos equipamentos não são consideradas, uma vez que em condições nominais os “set-point” são fixos em 20°C para o aquecimento e 25°C para o arrefecimento e o perfil de utilização e potência de equipamentos também se encontram pré-definidos.

Apesar destas medidas não serem contabilizadas para o cálculo do indicador de eficiência energética após as medidas de racionalização dos consumos de energia (IEE_{MRE}), estas são consideradas para a diminuição da fatura elétrica proveniente de uma má utilização dessas componentes.

5.8.5.2 Determinação do indicador de eficiência energética e da classe energética do edifício em estudo

Assim, considera-se a substituição de todas as lâmpadas fluorescentes T8 de 18 e 36 W com balastros ferro-magnéticos por lâmpadas TL-D com as mesmas potências, mas com balastros eletrónicos. Os valores dos fatores de correção climática correspondem aos já apresentados no cálculo do IEE_{nom} .

Os resultados dos consumos de energia obtidos pelo modelo de simulação do edifício convertidos para energia primária correspondem aos seguintes:

$$Q_{aq} = 4\,962,46 \text{ kgep ano}^{-1}$$

$$Q_{arref} = 2\,708,27 \text{ kgep ano}^{-1}$$

O valor de IEE_{MRE} é então dado por:

$$IEE_I = 2,04 \text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

$$IEE_V = 1,30 \text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

$$IEE_{MRE} = 32,37 \text{ kgep m}^{-2}\text{ano}^{-1}$$

Conclui-se então, que na escala de classes de desempenho energético, definida por tipologia para os grandes edifícios de serviços, o edifício em estudo com esta medida continua a pertencer à **classe energética B**.

5.9 Cálculo dinâmico simplificado

5.9.1 Caracterização dos consumos energéticos

Para o edifício em estudo foram apenas modificados os dados climáticos, a área útil de pavimento de cada zona térmica, as áreas exteriores e as suas orientações e os perfis de iluminação, ocupação e de utilização de equipamentos.

Tabela 44 – Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso Térreo)

Zona térmica	Piso	Ocupantes	Área (m ²)	Pd (m)
Zona comum	R/C	12	104,12	3
Gabinete		7	61,94	
Gabinete		2	28,64	
Zona comum		12	104,05	
Gabinete		2	42,45	

Tabela 45 - Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso 1)

Zona térmica	Piso	Ocupantes	Área (m ²)	Pd (m)
Gabinete	1	1	32,11	4,5
Gabinete		2	32,51	
Gabinete		2	14,50	3
Gabinete		3	30,01	
Gabinete		2	18,75	
Zona comum		1	45,97	4,36
Gabinete		1	14,34	3
Gabinete		2	13,02	
Gabinete		1	8,23	
Gabinete		1	6,00	
Gabinete		1	11,67	

Tabela 46 - Distribuição do número de ocupantes por cada zona térmica (Piso 2)

Zona térmica	Piso	Ocupantes	Área (m ²)	Pd (m)
Gabinete	2	1	26,77	3
Gabinete		8	67,30	
Gabinete		5	33,46	
Reprografia		1	34,69	3,8
Zona comum		5	36,99	3,8
Gabinete		1	15,19	
Gabinete		2	15,19	
Gabinete		10	61,09	3
Gabinete		1	18,44	
Gabinete		1	15,04	
Gabinete		2	17,08	
Gabinete		1	10,42	
Zona comum		1	39,22	

Na Tabela 47, Tabela 48 e Tabela 49 encontram-se as orientações da área exterior para cada piso.

Tabela 47 – Orientação da área da envolvente exterior (Piso Térreo)

Zona térmica	Piso	Área exterior (A _{ext})			
		N	S	E	W
Zona comum	R/C	23,47	-	23,47	-
Gabinete		-	27,30	-	-
Gabinete		-	12,63	14,29	-
Zona comum		39,79	-	-	23,54
Gabinete		-	18,78	-	20,35
Zona comum		14,93	14,93	-	-

Tabela 48 - Orientação da área da envolvente exterior (Piso 1)

Zona térmica	Piso	Área exterior (A _{ext})			
		N	S	E	W
Gabinete	1	14,93	-	-	-
Gabinete		24,37	-	31,49	-
Gabinete		-	-	9,48	-
Gabinete		-	22,42	9,48	-
Gabinete		-	10,54	-	-
I. S		-	8,85	-	-
Zona comum		13,59	13,59	-	-
Sala de reuniões		57,36	-	-	24,46
Gabinete		-	11,24	-	11,49
Gabinete		-	8,99	-	-
Gabinete		-	-	-	6,59
Gabinete		-	10,88	-	-
I.S		-	6,88	-	-

Tabela 49 - Orientação da área da envolvente exterior (Piso 2)

Zona térmica	Piso	Área exterior (A_{ext})			
		N	S	E	W
Gabinete	2	-	11,90	-	-
Gabinete		-	29,92	20,24	-
Gabinete		-	11,82	25,47	-
Gabinete		-	10,48	-	-
Reprografia		-	18,31	-	-
Zona comum		-	17,59	-	-
Zona comum		17,59	-	-	-
Gabinete		-	-	-	12,21
Gabinete		17,04	-	-	12,21
Gabinete		34,26	-	-	-
Gabinete		-	11,98	-	13,86
Gabinete		-	9,77	-	-
Gabinete		-	11,09	-	-
Gabinete		-	-	-	7,83
Zona comum		-	8,75	-	-

Por fim, na Tabela 50 encontram-se os valores dos consumos de energia para cada zona térmica.

Tabela 50 – Consumo de energia para cada zona térmica

	Consumo de energia (kWh)			
	Equipamentos	Iluminação	Aquecimento	Arrefecimento
Total (kWh)	53 983,00	37 250,10	28 409,20	25 012,40

■ Equipamentos ■ Iluminação ■ Aquecimento ■ Arrefecimento ■ Outros

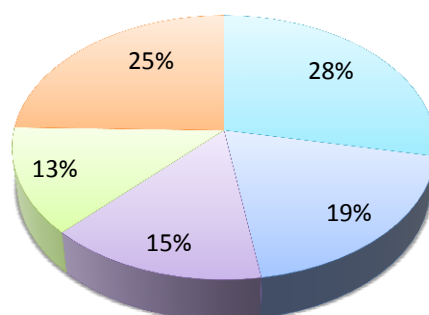


Figura 29 - Gráfico dos consumos energéticos (%) dos diferentes sectores obtido com o método horário simplificado

Após a análise da Figura 29 verifica-se que o maior consumo energético é nos equipamentos, representando cerca de 28 % do consumo total anual, tal como havia acontecido para as condições nominais. O consumo de energia para arrefecimento é de 13 %, passando a ser o sector onde o consumo é menor. Comparativamente às percentagens obtidas após simulação em condições nominais, o consumo de energia no setor da iluminação sofreu um decréscimo e as necessidades de aquecimento e arrefecimento subiram. Esta descida deve-se à atribuição de um valor de iluminância (*lux*) que para cada zona térmica. O sistema de iluminação apenas se ativa quando o valor de lux predefinido para cada zona não for atingido através da radiação solar direta.

5.9.2 Determinação da classe energética do edifício X

A avaliação energética com recurso ao CD_s classifica o presente edifício como sendo um C. Os consumos alcançados com a utilização deste método encontram-se na Tabela 51.

Tabela 51 – Classe energética do edifício X a partir do método horário simplificado

Indicador	Edifício real	Edifício Referência
IEE_s	117,0	110,9
IEE_T	198,2	198,2
IEE_{ren}	0,0	0,0
IEE	315,2	309,1
R = 1,06 → Classe C		

Assim, o método horário simplificado integra o edifício X na classe energética C.

5.10 Síntese dos resultados do Edifício X

Ao contrário do Edifício Solar XXI, o edifício X varia a classe energética quando recorre ao cálculo dinâmico simplificado para determinar os indicadores de eficiência energética. A Tabela 52 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nas diferentes metodologias.

Tabela 52 – Classe energética obtida pelas diferentes metodologias para o Edifício X

	Metodologias aplicadas		
	$SD_{nominais}$	SD_{reais}	CD_s
IEE_{nom}	33,97	-	-
IEE_s	-	129,20	117,00
IEE_{ren}	-	0,00	0,00
$IEE_{s,ref}$	-	135,52	110,90
R	-	0,95	1,06
Classe energética	B⁺	B⁻	C

6. Análise da influência dos elementos construtivos no consumo de energia

Este capítulo tem como objetivo o estudo da influência da variação de alguns parâmetros construtivos relativamente aos consumos energéticos do edifício X.

6.1 Variáveis construtivas

A transmissão de calor por condução através da envolvente dos edifícios quer sejam as perdas de calor através dos elementos construtivos da envolvente no inverno, quer os ganhos indesejáveis de calor através dos mesmos elementos no verão, são fenómenos que influenciam o comportamento térmico dos edifícios. Para minimizar estes efeitos em ambas as estações, deve-se aumentar a resistência térmica dos elementos construtivos. Para que se dê esse aumento da resistência tem de se tomar medidas como: a incorporação de materiais isolantes na envolvente opaca do edifício e a seleção de janelas onde o conjunto “vidro/caixilho/persiana” apresente valores de resistência térmica elevados (por exemplo, vidros duplos)(Gonçalves and Camelo 2008).

6.1.1 Isolamento térmico na envolvente do edifício

A caracterização das paredes simples da fachada abrange soluções definidas em função de elementos construtivos. Para este caso, a solução passa pela introdução/alteração do isolamento térmico do edifício(Carlos A.Pina dos Santos 2006).

O isolamento térmico consiste na utilização de materiais na constituição das paredes, coberturas e pavimentos que, pelas suas características, permitem aumentar a resistência às trocas de calor com o exterior. Deste modo, pretende-se economizar energia, ao diminuir as perdas térmicas através das paredes. Com a introdução do isolamento térmico também se reduz os riscos de condensação em alguns casos e, melhorando as suas qualidades térmica, noutros (Moita, 2010).

6.1.1.1 Propriedades

O isolamento térmico pode ser aplicado ao exterior e ao interior. No caso em estudo considerou-se o isolamento térmico pelo exterior (Figura 30) aumentando assim a sua “eficiência” uma vez que na estação mais fria mantém a “massa inercial” do edifício conservando-o mais quente e na estação quente tem a função de uma barreira ao calor. Este tipo de solução é a utilizada no Edifício Solar XXI. Neste tipo de isolamento os materiais mais utilizados são: as placas de lã mineral, placas de poliestireno expandido moldado (EPS) e placas de poliestireno expandido extrudido (XPS)(Carlos A.Pina dos Santos 2006). As características das paredes internas e externas encontram-se nas duas tabelas que se seguem.

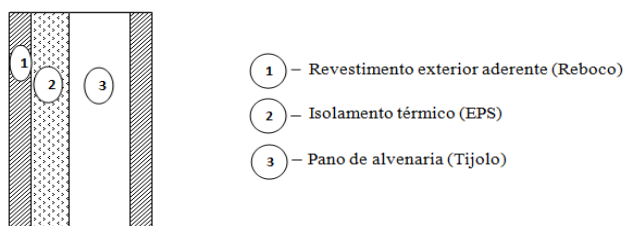


Figura 30 – Parede simples de fachada com isolamento térmico pelo exterior

Tabela 53 – Características das paredes internas do edifício X

Paredes interiores	Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Densidade (kg m^{-3})
Reboco	0,025	1,3	1 044	1 800
Tijolo Furado	0,11	0,6	828	1 300
Reboco	0,025	1,3	1 044	1 800

Tabela 54 – Características das paredes exteriores do edifício X

Paredes exteriores	Espessura (m)	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Densidade (kg m^{-3})
Reboco	0,025	1,3	1 044	1 800
Isolamento	Variável	0,04	1 512	15
Tijolo Furado	0,11	0,6	828	1 300
Reboco	0,025	1,3	1 044	1 800

6.1.2 Vãos envidraçados

A localização do sol ao longo do ano tem uma grande importância, no que respeita à definição da localização das fachadas envidraçadas de um edifício, a sua dimensão e o tipo de vidro escolhido.

Os vãos envidraçados separam dois ambientes com condições térmicas muito distintas que influenciam as trocas energéticas entre si. Os parâmetros climáticos que determinam a transferência de calor através dos vãos envidraçados são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. As condições do ambiente exterior e o desempenho térmico da envolvente dos edifícios determinam a ordem de grandeza das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento a satisfazer para garantir um determinado nível de conforto térmico no interior dos edifícios.

Em termos anuais de radiação solar, verifica-se que uma fachada envidraçada orientada a sul receberá um maior nível de radiação solar do que fachadas noutras orientações, sendo que no verão é uma fachada mais facilmente protegida dessa mesma radiação.

As fachadas do edifício estão orientadas a norte e sul, sendo a fachada principal a orientada a sul.

Nesta parte da tese, abordam-se as características principais dos diferentes tipos de vidros para determinadas percentagens de vãos envidraçados na fachada, sem sombreamento.

A variação de vãos envidraçados foi dos 10 até aos 100 %, em intervalos de 10 %.

6.1.2.1 Tipos de Vidro

Neste tópico estão apresentadas as características dos diferentes tipos que foram estudados para as várias percentagens de vãos envidraçados.

Tabela 55 – Propriedades do vidro simples da fachada do edifício

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Fator solar	Transmissão de radiação solar direta	Transmissão de luz visível	$U_{s/caixilho}$ ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Simples	4	0,861	0,837	0,898	5,894

Tabela 56 – Propriedades do vidro duplo da fachada do edifício

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Fator solar	Transmissão de radiação solar direta	Transmissão de luz visível	$U_{s/caixilho}$ ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Duplo incolor	4 - 6 (ar) - 4	0,74	0,67	0,801	3,146

Tabela 57 – Propriedades do vidro duplo de baixo fator solar da fachada do edifício

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Fator solar	Transmissão de radiação solar direta	Transmissão de luz visível	$U_{s/caixilho}$ ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Duplo de baixo fator solar	4 - 6 (ar) - 4	0,446	0,231	0,326	3,137

6.2 Variação das soluções construtivas e de perfis de utilização para dois climas distintos

6.2.1 Lisboa

O clima de Lisboa é do tipo mediterrâneo, caracterizado por um verão quente e seco e pela concentração de maior parte da precipitação no período entre Outubro e Abril. As características do clima de Lisboa dependem de fatores geográficos regionais como a latitude e a proximidade do Oceano Atlântico, o qual lhe confere uma amenidade térmica e um regime de ventos marcado por uma elevada frequência de ventos de Norte e Noroeste (Alcoforado, Lopes et al. 2006). As temperaturas médias máxima e mínima são 22,5 °C e 10,6 °C, respetivamente.

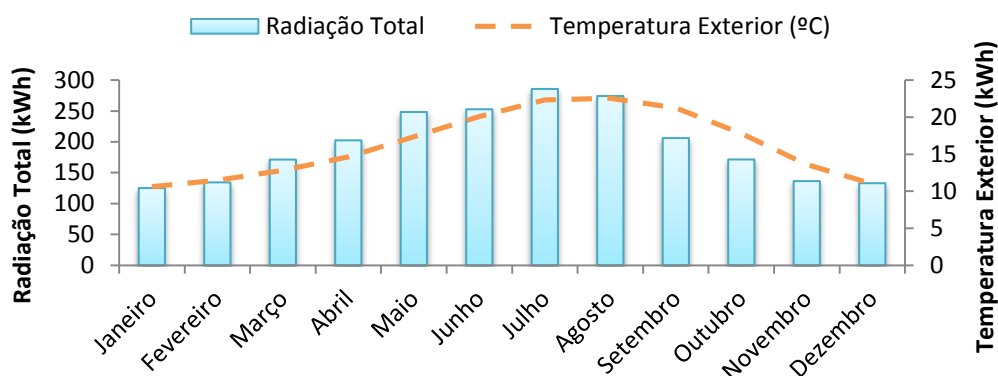


Figura 31 – Dados da radiação solar e temperaturas exteriores para Lisboa

6.2.1.1 Escritórios

O perfil utilizado na região de Lisboa, para verificar a influência da variação do isolamento nos consumos energéticos do edifício X, é o considerado no ponto 4.8.4.

Teve-se em consideração a variação da espessura do isolamento na envolvente do edifício (tópico 6.1.1.1), tendo como mínimo 2 cm e máximo 40 cm. Para esta variação apenas se estudou o comportamento do consumo das necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício em função da variação da espessura do isolamento térmico.

A Tabela 58 contém os valores do consumo energético para aquecimento e arrefecimento do edifício em estudo.

Tabela 58 – Consumo energético de AVAC em função da espessura do isolamento térmico

Espessura do isolamento (cm)	2	4	6	8	10	15	20	25	30
Aquecimento (kWh)	1 807,7	1 576,7	1 451,2	1 373,1	1 320,5	1 240,5	1 196,5	1 169,4	1 129,0
Arrefecimento (kWh)	27 831,2	28 698,2	29 228,4	29 588,4	29 847,1	30 262,5	30 508,9	30 670,2	30 926,0

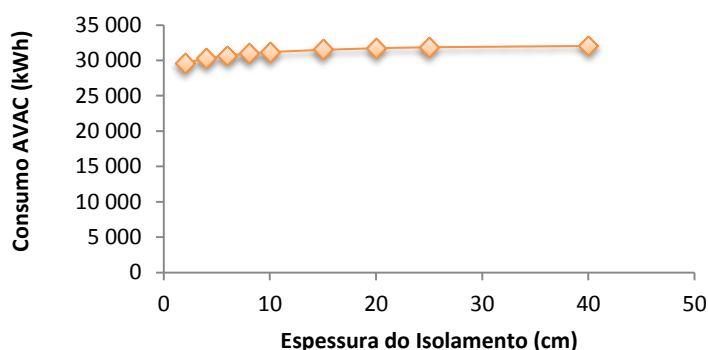


Figura 32 – Consumo de AVAC em função da espessura do isolamento térmico para a região de Lisboa

Após a análise dos resultados obtidos é possível verificar que, para a região de Lisboa, o aumento do isolamento térmico conduz a um decréscimo nas necessidades de aquecimento. Porém, as necessidades de arrefecimento aumentam. Este crescimento deve-se ao facto de o aumento do isolamento (aumento da resistência térmica) diminuir as perdas de calor, sendo sempre necessário proceder a ativação dos sistemas de frio. Em suma, o aumento do isolamento térmico, para o edifício X, leva a um aumento do consumo de AVAC (Figura 32). Este crescimento não é linear.

Outra solução que se estudou foi a variação dos vãos envidraçados da envolvente do edifício. Para este estudo teve-se em consideração o perfil do ponto 5.8.4.1 e as características construtivas apresentadas em 6.1.2.1 com um isolamento de 6 cm. Este estudo tem o intuito de verificar a influência da percentagem de vãos envidraçados de vidro simples, duplo e duplo de baixo fator solar no consumo de iluminação e de necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Os resultados apresentados de seguida (Tabela 59) são para a variação de vãos envidraçados de vidro simples.

Tabela 59 – Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro simples)

		Aquecimento (kWh)	Arrefecimento (kWh)	Total AVAC (kWh)	Iluminação (kWh)	Consumo Total (kWh)
% vãos envidraçados	10	1 493,9	18 674,6	20 168,5	40 328,4	60 496,9
	20	1 673,1	22 328,3	24 001,4	26 380,6	50 382,0
	30	1 800,3	28 121,6	29 921,9	22 453,0	52 375,0
	40	1 926,6	34 151,7	36 078,3	20 887,0	56 965,3
	50	2 058,8	40 039,8	42 098,6	19 975,9	62 074,5
	60	2 198,9	45 636,0	47 834,9	19 353,4	67 188,3
	70	2 374,3	50 778,0	53 152,3	18 921,8	72 074,1
	80	2 607,7	54 748,3	57 356,0	18 670,8	76 026,8
	90	2 823,5	60 246,8	63 070,3	18 389,1	81 459,4
	100	3 061,3	63 887,3	66 948,6	18 177,6	85 126,2

Após análise da Tabela 59 verifica-se que o aumento da percentagem de vãos envidraçados de vidro simples induz a uma diminuição de necessidades de iluminação. Tal facto seria de prever uma vez que há diminuição de zona opaca na fachada o que permite a entrada de luz natural no edifício. Outras consequências do aumento dos vãos envidraçados são o aumento das necessidades de aquecimento e de arrefecimento. As necessidades de arrefecimento são cerca de vinte vezes superiores às de aquecimento, para o vidro simples. Este comportamento é justificado pelos ganhos internos que são elevados (15 W m^{-2}) e que já proporcionam aquecimento às diversas zonas do edifício. Em termos de consumo total de energia, este vai diminuindo até que atinge um ponto (20 %) em que o consumo volta a aumentar devido ao crescimento das necessidades de AVAC.

Na variação dos vãos envidraçados estudou-se também a utilização de vidro duplo de dois tipos: vidro duplo incolor e vidro duplo com um baixo fator solar. A análise destes dois tipos de vidro foi feita deste modo para se poder verificar a influência do valor do fator solar.

Na Tabela 60 estão representados os valores obtidos por simulação dos consumos energéticos do edifício para diferentes percentagens de vãos envidraçados com vidro duplo incolor.

Tabela 60 - Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro duplo incolor)

		Aquecimento (kWh)	Arrefecimento (kWh)	Total AVAC (kWh)	Iluminação (kWh)	Consumo Total (kWh)
% vãos envidraçados	10	1 323,2	18 865,5	20 188,7	42 211,9	62 400,6
	20	1 328,5	21 985,6	23 314,1	27 722,6	51 036,7
	30	1 309,0	27 478,0	28 787,0	23 177,2	51 964,2
	40	1 295,8	33 520,5	34 816,3	21 433,6	56 249,9
	50	1 290,8	39 589,3	40 880,1	20 450,6	61 330,7
	60	1 293,2	45 493,8	46 787,0	19 789,9	66 576,9
	70	1 322,3	51 062,4	52 384,7	19 335,8	71 720,5
	80	1 400,5	55 535,8	56 936,3	19 067,7	76 004,0
	90	1 470,1	61 475,3	62 945,4	18 765,1	81 710,5
	100	1 562,8	65 615,9	67 178,7	18 537,5	85 716,2

Tal como para a utilização de vidro simples, o consumo total atinge o seu valor mínimo a 20 % de vãos envidraçados. O valor do consumo total apenas difere em, aproximadamente, 1 000 kWh do obtido em vãos envidraçados de vidro simples. Este facto ocorre devido à proximidade do valor do fator solar assim como o de luminosidade. Uma vez que estes valores são próximos, as necessidades de iluminação não tiveram grandes diferenças, assim como os consumos de arrefecimento que foram ligeiramente superiores.

As necessidades de aquecimento sofreram pequenas flutuações, podendo dizer que não foram influenciadas pela percentagem de vãos envidraçados. Este comportamento deve-se à baixa condutividade térmica do vidro duplo incolor. Esta característica proporciona reduzidas perdas térmicas pela envolvente conservando os ganhos internos no interior do edifício.

Por fim, fez-se uma simulação dinâmica para a utilização de vidro duplo com baixo fator solar na fachada do edifício X de modo a verificar a sua influência em termos de consumo de iluminação e de AVAC.

Na Tabela 61 encontram-se os valores resultantes da simulação.

Tabela 61 - Consumos energéticos para diferentes percentagens de vãos envidraçados (vidro duplo de baixo fator solar)

		Aquecimento (kWh)	Arrefecimento (kWh)	Total AVAC (kWh)	Iluminação (kWh)	Consumo Total (kWh)
% vãos envidraçados	10	1 387,3	19 220,2	20 607,5	51 285,1	71 892,6
	20	1 515,7	20 174,5	21 690,2	39 838,6	61 528,8
	30	1 665,6	21 972,2	23 637,8	31 822,5	55 460,3
	40	1 801,8	24 522,0	26 323,8	27 364,1	53 687,9
	50	1 920,7	27 489,8	29 410,5	24 999,2	54 409,7
	60	2 028,2	30 592,5	32 620,7	23 671,5	56 292,2
	70	2 141,3	33 602,4	35 743,7	22 856,0	58 599,7
	80	2 271,4	36 210,5	38 481,9	22 701,9	61 183,8
	90	2 396,8	39 723,9	42 120,7	22 272,1	64 392,8
	100	2 537,9	42 293,7	44 831,6	21 938,2	66 769,8

Ao contrário do que se passou nos casos anteriores, o consumo energético mínimo foi atingido aos 40 % de vãos envidraçados. O alcance desse mínimo nesta percentagem pode dever-se à gradual descida do consumo de iluminação complementada pelo aumento das necessidades de arrefecimento.

Neste caso concreto, o valor do fator solar é inferior aos outros dois tipos de vidro, assim como o valor de transmissão de radiação solar direta, o que conduz a elevados valores de iluminação comparativamente aos outros dois tipos de vidros utilizados nas simulações anteriores.

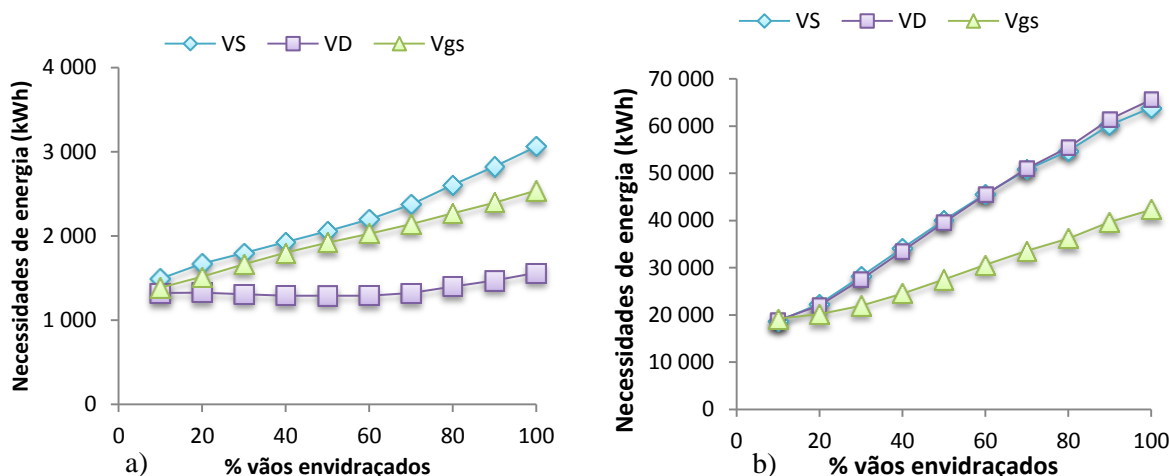


Figura 33 – a) Necessidades de aquecimento em função da % de vãos envidraçados para vidro simples (VS), vidro duplo (VD) e vidro duplo com baixo g_s (V_{gs}); b) Necessidades de arrefecimento em função da % de vãos envidraçados para VS, VD e V_{gs}

Após a análise da Figura 33, verifica-se que há um maior consumo de aquecimento aquando a utilização de vidro simples, e um menor para o caso de vidro duplo. Esta diferença no vidro simples deve-se à sua reduzida resistência térmica, permitindo que haja mais trocas de calor do que para os restantes casos. Comparando os dois vidros duplos, o vidro duplo com baixo fator solar leva a um consumo maior de aquecimento. As necessidades de aquecimento são maiores porque esse vidro duplo tem valores de fator solar menores que o do vidro duplo incolor, permitindo que haja uma menor transferência de calor.

Para o caso da Figura 33 b), o tipo de vidro que conduz a um menor consumo de arrefecimento é o vidro duplo escuro. O consumo de energia para arrefecimento é muito próximo quando se utiliza vidro simples ou vidro duplo incolor.

O perfil de escritórios tem ganhos internos elevados devido à potência dos equipamentos (15 W m^{-2}). Estes ganhos traduzem-se em calor, o que faz com que haja necessidade de arrefecimento, até mesmo durante o período noturno. Assim, é de notar que as necessidades de arrefecimento são cerca de dez vezes maiores que as de aquecimento. Em termos de consumo total, ou seja, a soma do consumo de AVAC com a iluminação, obtiveram-se os resultados representados na Figura 34.

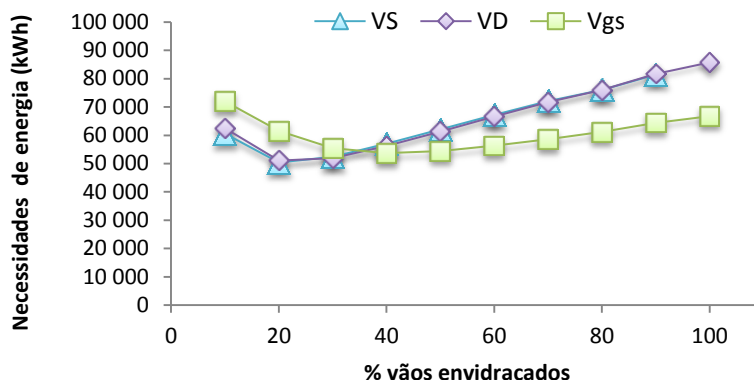


Figura 34 – Consumo total de energia em função da percentagem de vãos envidraçados e do tipo de vidro utilizado

A partir da Figura 34 verifica-se que até aos 20 % de vãos envidraçados a utilização de vidro simples é a mais favorável para o perfil de escritórios em Lisboa. Com o aumento da percentagem de vãos envidraçados na fachada o uso vidro duplo com baixo fator solar nas fachadas é o que conduz a menores consumos totais de energia. Este facto pode ser justificado devido à menor necessidade de energia para arrefecimento comparativamente aos outros dois tipos de vidro.

6.2.2 Fundão

As temperaturas médias máxima e mínimas são 21,4 °C e 5,8 °C, respetivamente.

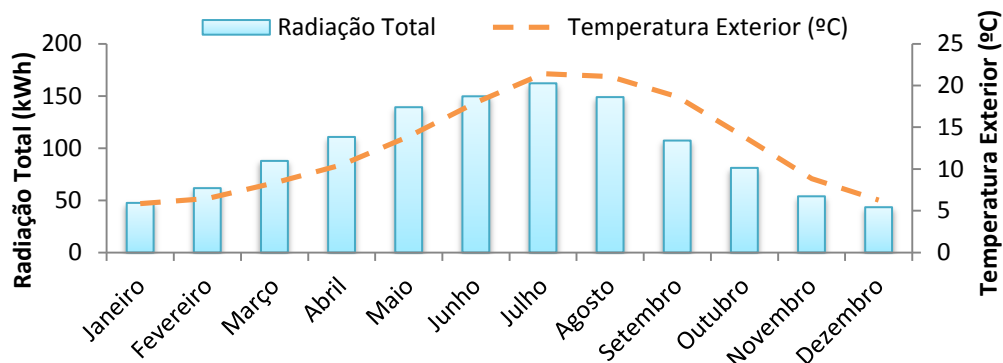


Figura 35 - Dados da radiação solar e temperaturas exteriores para o Fundão

6.2.2.1 Escritórios

As simulações dinâmicas ocorridas para o perfil de escritórios para a região do Fundão têm as mesmas características que as utilizadas no ponto 6.2.1.1.

Na Figura 36 estão representados os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento resultantes da variação da espessura do isolamento das paredes exteriores do edifício X.

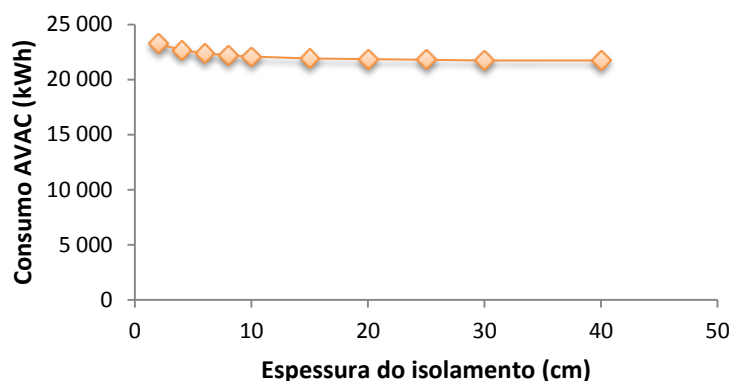


Figura 36 - Consumo de AVAC em função da espessura do isolamento térmico para a região do Fundão num perfil de escritórios

Ao comparar os resultados para o mesmo perfil numa região diferente, observa-se que ao contrário do que acontecia para a região de Lisboa, o consumo de AVAC diminui com o aumento do isolamento na região do Fundão. A soma da energia consumida nas necessidades de aquecimento e de arrefecimento é inferior devido às temperaturas exteriores dessa região, isto é, à medida que o edifício se encontra mais isolado, as necessidades de aquecimento diminuem devido ao decréscimo das transferências de calor do interior do edifício com o exterior. Os ganhos internos são elevados e com o aumento do isolamento estes mantêm-se no interior do edifício proporcionando conforto aos ocupantes. O consumo de energia destinado ao arrefecimento apenas cresce 14 % ao longo da variação da espessura do isolamento.

O comportamento da iluminação e do consumo de AVAC é influenciado com a variação da percentagem de vãos envidraçados. Como acontecia para Lisboa, a energia gasta para iluminação diminui com o aumento da percentagem de janelas na fachada e o consumo de AVAC aumenta. O consumo de energia de aquecimento e arrefecimento apresenta o mesmo comportamento da região de Lisboa, neste mesmo perfil.

Em termos de consumo total de energia, os dados obtidos constam na Tabela 62.

Tabela 62 – Consumo total de energia em diferentes percentagens de vãos envidraçados e tipos de vidro

Consumo Total (kWh)				
% vãos envidraçados		Vidro simples	Vidro duplo incolor	Vidro duplo de baixo g _s
	10	64 812,5	65 689,1	72 066,4
	20	52 365,8	52 529,7	64 461,9
	30	49 166,4	47 907,8	57 652,1
	40	49 308,6	47 193,1	53 611,3
	50	50 381,6	47 690,5	51 769,1
	60	51 836,2	48 720,5	51 286,1
	70	53 449,9	49 981,9	51 467,5
	80	55 150,6	51 388,4	52 670,0
	90	57 238,4	53 188,9	53 618,3
	100	58 827,7	54 612,7	54 478,9

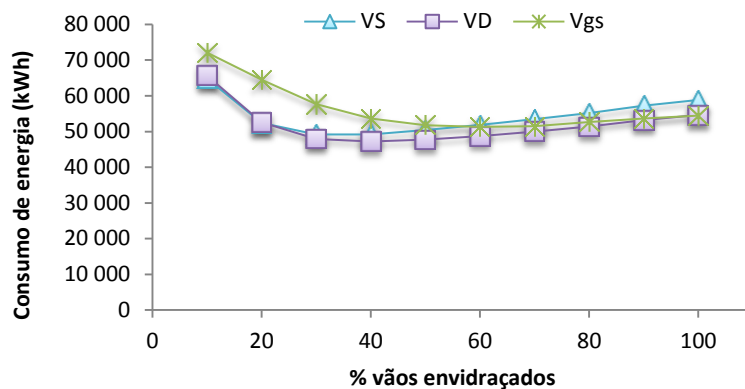


Figura 37 - Consumo total de energia em função da percentagem de vãos envidraçados e do tipo de vidro utilizado para o perfil Escritório na região do Fundão

O vidro simples tem um decréscimo no consumo de energia total até aos 30 % de vãos, o vidro duplo incolor até aos 40 % e o vidro duplo com um g_s baixo até aos 60 %. Pode-se dizer, após a análise da Tabela 62 e da Figura 37, que o tipo de vidro que conduz a menores consumos de energia para a região do Fundão, no perfil de escritório, é o vidro duplo incolor.

7. Análise do nível ótimo de rentabilidade

A diretiva 2010/31/EU, EPBD, estipula que os estados membros devem assegurar requisitos mínimos de desempenho energético com vista a alcançar níveis ótimos de rentabilidade para edifícios, frações ou elementos do mesmo. Tal deve ser feito utilizando metodologias de comparação estabelecidas pela comissão, recorrendo também a parâmetros com características específicas de cada país.

“Nível ótimo de rentabilidade” ou “custo ótimo”, é definido como o desempenho energético que leva ao custo mais baixo durante o ciclo de vida económico estimado, em que:

- O custo mais baixo é determinado tendo em conta os custos de investimento⁴, de manutenção e de funcionamento relacionados com a energia, para o período de vida do edificado;
- O ciclo de vida económico estimado é determinado pelos Estados-Membros. Diz respeito ao ciclo de vida económico restante estimado de um edifício, se os requisitos de desempenho energético forem fixados para o edifício no seu conjunto; ou ao ciclo de vida económico de um componente, se os requisitos de desempenho energético forem fixados para os componentes do edifício.

A determinação do custo ótimo graficamente encontra-se ilustrada na Figura 38.

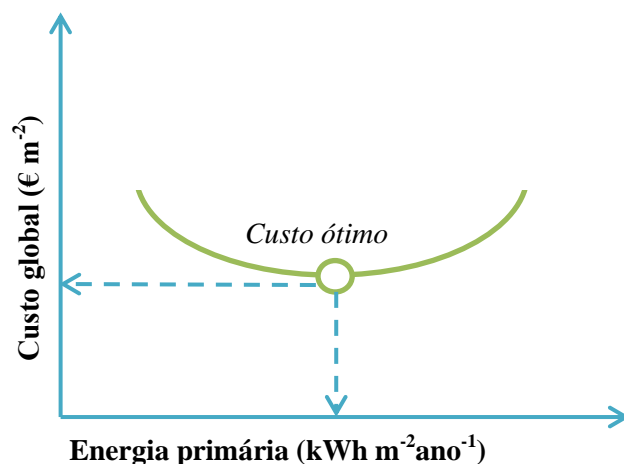


Figura 38 – Esquema ilustrativo da determinação do custo ótimo

⁴ O custo de investimento tem apenas em consideração os custos de mão-de-obra, dos materiais e de componentes relevantes para o desempenho energético do edifício. Exemplos desses componentes são: isolamento térmico, vãos envidraçados, soluções de climatização, entre outros.

7.1 Metodologia

A Figura 39 ilustra o método de obtenção do custo ótimo de um edifício.

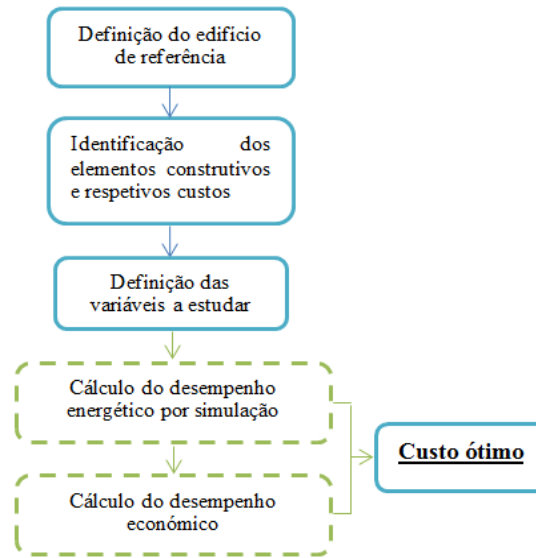


Figura 39 – Metodologia de cálculo para o custo ótimo (BPIE 2010)

O desempenho energético do edifício é feito por simulação, analisando as necessidades energéticas do edifício com a variação de determinadas soluções construtivas.

Em termos matemáticos o custo ótimo é dado pela relação entre o custo global (C_g) e a energia primária consumida pelo edifício. A equação (15) especifica o cálculo do custo global:

$$C_g = \frac{C_I + \sum_{i=1}^{30} (C_{a,i} \times R_d(i))}{A_{floor}} - \frac{C_g^{ref}}{A_{floor}} \quad (15)$$

definindo C_g como o custo global (€ m²), C_I como o custo de investimento inicial (€), $C_{a,i}$ o custo anual de energia (€), $R_d(i)$ o fator de desconto, A_{floor} a área de pavimento climatizada (m²) e C_g^{ref} o custo global do edifício de referência (€ m²).

O custo de inicial de investimento tem em consideração os preços⁵ para cada m² (C_{m^2}), incluindo as despesas com mão-de-obra e manutenção (C_{manut}) ao longo do ciclo de vida do edifício, por área de pavimento climatizada (A_c) (equação (16)).

$$C_I = (C_{m^2} + C_{manut}) * A_c \quad (16)$$

O cálculo do custo global tem em conta os consumos energéticos e o preço de energia por cada tipo de fonte. Neste caso específico utiliza-se a eletricidade com um custo médio de 0,14 € kWh⁻¹. A equação (17) traduz o custo das necessidades do edifício:

$$C_{a,i} = (Q_{aq} + Q_{arref} + Q_{ilum}) \times \epsilon_{elet} \quad (17)$$

sendo Q_{ilum} o consumo de energia elétrica em iluminação (kWh) e ϵ_{elet} o preço da energia elétrica por unidade de energia (€ kWh⁻¹).

⁵ Os preços utilizados no cálculo do custo global foram obtidos a partir do site gerador de preços para a construção civil da CYPE.

Com a alteração do tarifário torna-se relevante considerar uma variável de desconto, ou seja, uma variável que tenha em conta uma taxa de desconto diferenciada de ano para ano. O fator de desconto é obtido a partir da equação (18):

$$R_d(i) = \left(\frac{1}{1 + \frac{R}{100}} \right)^P \quad (18)$$

onde R é a taxa de desconto, tendo como constante o valor percentual de 3 e P o tempo de vida do edifício (anos).

Por fim, define-se C_g^{ref} como o custo global para o edifício em situação de referência, sendo calculado do mesmo modo que a variável C_g .

Os subcapítulos seguintes demonstram a relação do custo por área de componente com a energia primária do edifício. As simulações foram feitas para o edifício X nas regiões do Fundão e de Lisboa.

7.2 Casos de estudo

7.2.1 Isolamento Térmico

Uma das variáveis que influencia o comportamento térmico de um edifício e, conseqüentemente, o consumo energético do mesmo é o isolamento térmico. A aplicação ou ausência do isolamento provoca alterações nas necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento de um edifício.

Os resultados que irão ser apresentados referem-se à variação da espessura do isolamento térmico e respetivo custo de implementação/manutenção para as regiões de Lisboa e Fundão. O ponto onde o eixo dos y 's é nulo é o ponto do edifício real, ou seja, a energia primária consumida efetivamente pelo edifício na ausência de isolamento térmico (situação construtiva real).

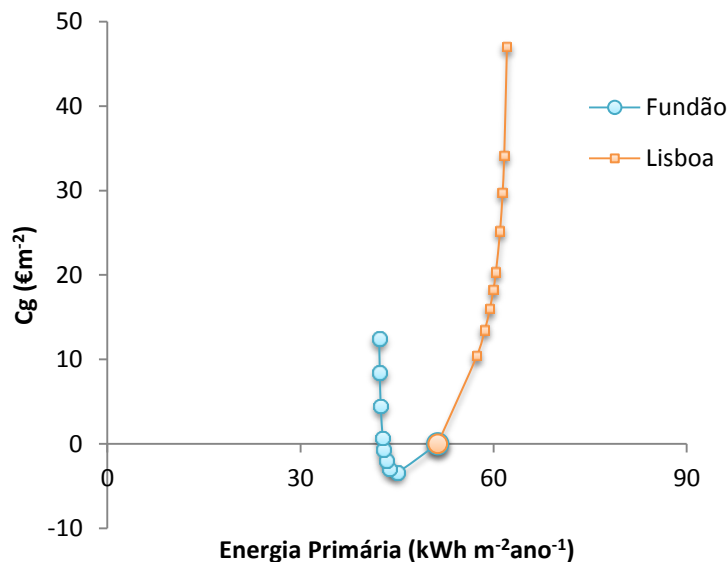


Figura 40 – Custo ótimo da implementação de variadas espessuras de isolamento térmico

É de salientar que para a região de Lisboa a situação real, ou seja, a ausência de isolamento é a mais rentável para o edifício em questão. Na região do Fundão, atinge-se um custo ótimo aos 2 cm de isolamento.

7.2.2 Vãos envidraçados

O custo ótimo permite encontrar a relação entre as necessidades energéticas do edifício e o custo das alterações para atingir essas necessidades. Uma das variáveis que influencia os consumos energéticos é a percentagem e o tipo de vãos envidraçados. Neste caso, estudou-se a variação da percentagem de vãos envidraçados nas fachadas e a alteração do tipo de vidro utilizado.

Os resultados obtidos podem ser analisados a partir das figuras que se seguem, salientando que cada ponto, exceto o da origem, corresponde ordenadamente às diferentes percentagens de vãos envidraçados. A Figura 41 corresponde aos dados das variações para a região de Fundão.

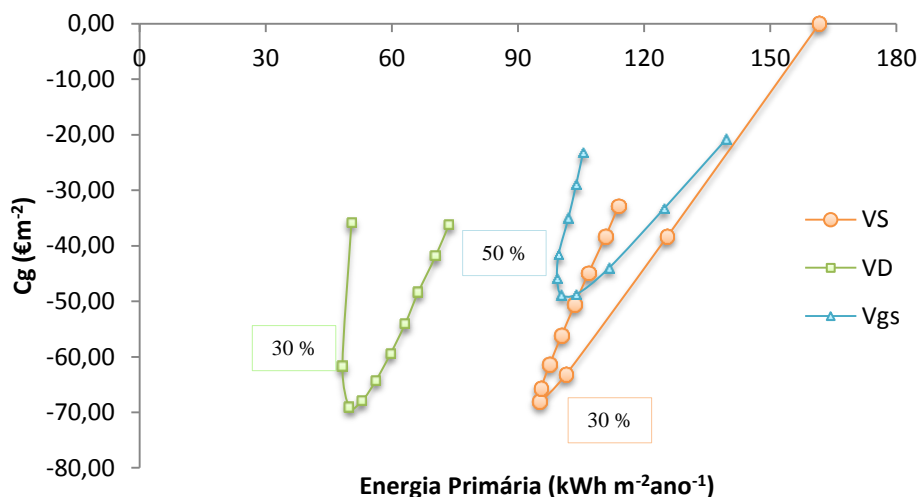


Figura 41 - Custo ótimo para diferentes tipos de vidros na região do Fundão

Após a observação dos dados verifica-se que para a região do Fundão, com o recurso a vidro simples ou vidro duplo incolor, obtém-se o custo ótimo aos 30 % de vãos na fachada mas para o vidro duplo de baixo g_s esse ponto ótimo é apenas atingido aos 50 %. Torna-se, assim, necessário proceder a uma comparação, podendo-se dizer que para a região do Fundão a solução mais compensatória, ou seja, a solução que permite alterações aos consumos reais do edifício a um custo ótimo, é a mudança de vidro simples (situação real) para vidro duplo incolor em 30 % da fachada.

Porém, surgiu uma questão: “Se o edifício com as mesmas características se situasse noutra região, será que apresentava o mesmo ponto ótimo?”. Para poder responder a esta questão fez-se o mesmo estudo, com as mesmas alterações, mas para a região de Lisboa (Figura 42).

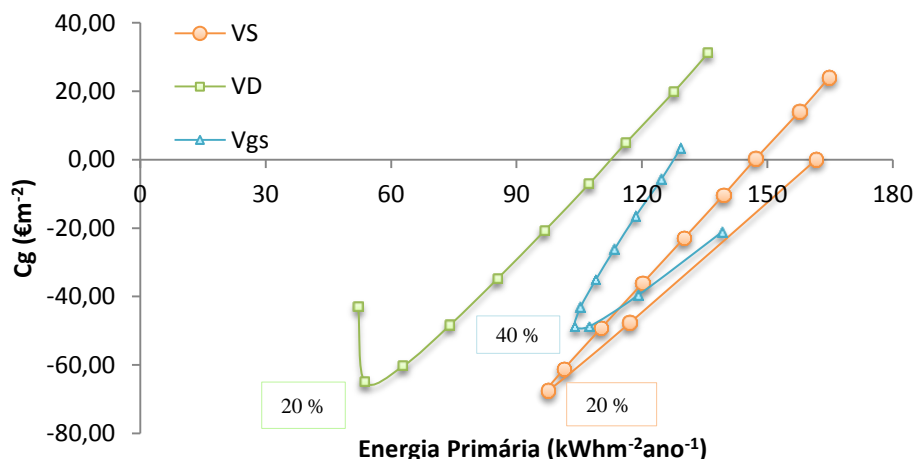


Figura 42 – Custo ótimo para diferentes tipos de vidros na região de Lisboa

As diferentes condições climáticas proporcionam diferentes resultados. Para o mesmo edifício, na região de Lisboa, obteve-se um custo ótimo idêntico para o vidro simples e o vidro duplo incolor, porém, o valor percentual difere do valor atingido para a região do Fundão, sendo agora de 20 %. O mesmo sucede quando se verifica o ponto ótimo para o vidro duplo de baixo fator solar, que passa de 50 para 40 a percentagem de vãos envidraçados. Assim, conclui-se que relativamente ao custo ótimo, o ponto de excelência é atingido ao colocar vidro duplo em 20 % da fachada do edifício. Os resultados do estudo comparativo entre as diferentes situações estão demonstrados na Figura 43.

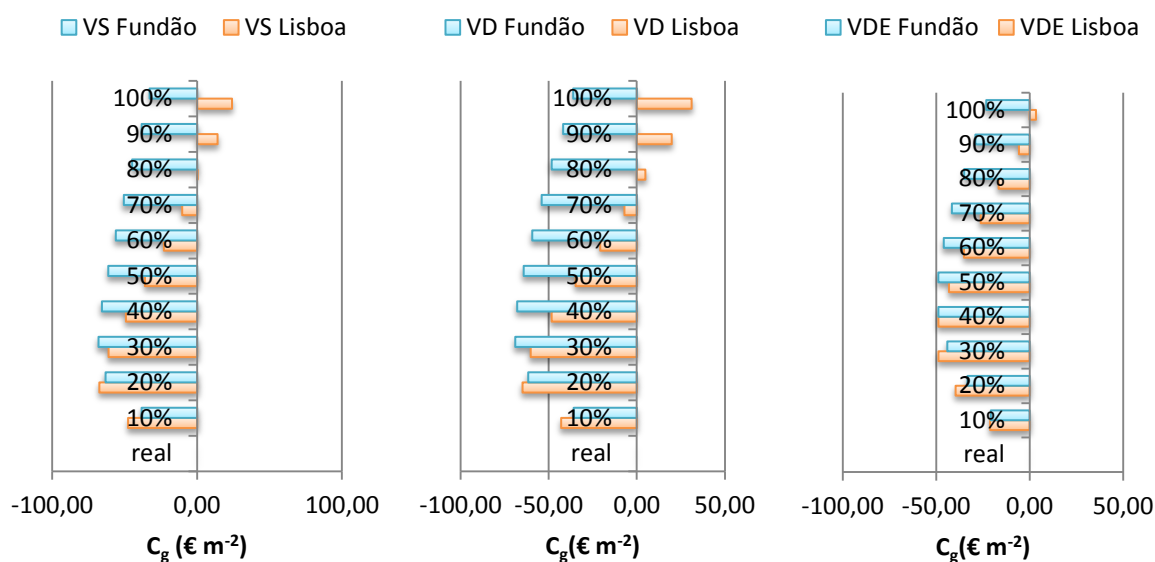


Figura 43 – Análise comparativa do custo global nas regiões do Fundão e de Lisboa para as diferentes percentagens de vãos envidraçados

8. Conclusão

Esta dissertação teve como fundamento a comparação dos novos métodos de determinação dos consumos energéticos em edifícios de serviços existentes e a determinação da respetiva classe energética.

A Tabela 63 tem como principal objetivo sintetizar os resultados obtidos com a aplicação dos três métodos.

Tabela 63 – Comparação dos resultados obtido pelos métodos: $SD_{nominais}$, SD_{reais} , CD_s

	Edifício Solar XXI (Lisboa)			Edifício X (Fundão)		
	$SD_{nominais}$	SD_{reais}	CD_s	$SD_{nominais}$	SD_{reais}	CD_s
IEE_{nom}	11,08	-	-	33,97	-	-
$IEE_{s,ref}$	-	49,54	66,60	-	135,52	110,90
IEE_s	-	25,50	40,40	-	129,20	117,00
IEE_T	-	47,20	54,00	-	158,60	198,20
IEE_{ren}	-	67,58	69,20	-	0,00	0,00
IEE	-	5,19	25,30	-	287,80	315,20
R	-	-0,85	-0,43	-	0,95	1,06
Classe	A ⁺	A ⁺	A ⁺	B ⁻	B ⁻	C

Após a análise dos resultados é possível concluir que, para o caso do Edifício Solar XXI, a classe energética não difere da atribuída pelo atual método ($SD_{nominais}$) o que, de algum modo, valida a utilização dos métodos propostos.

No caso do edifício X, a simulação dinâmica multi-zona em condições reais não difere do método em vigor, tornando viável a sua utilização. A aplicação do cálculo dinâmico simplificado, ao contrário do esperado, conduziu a uma classificação inferior (classe C). Tal facto poder-se-á dever à gama de temperaturas de *set-point* utilizadas no edifício, confirmadas durante a auditoria energética. As temperaturas são de 22°C (aquecimento) e 23°C (arrefecimento), o que difere, significativamente, das temperaturas de *set-point* de referência utilizadas (20 e 25°C).

Os métodos previstos para a nova regulamentação são de melhor compreensão, acessibilidade, e diminuem o tempo despendido aquando a determinação dos consumos de energia e respetiva classe energética. Deste modo, conclui-se que a aplicação das novas metodologias (simulação dinâmica multi-zona em condições reais e cálculo dinâmico simplificado) é adequada para a determinação da classe energética dos edifícios de serviço existentes.

O estudo dos consumos de energia com a variação de soluções construtivas permitiu concluir que, um mesmo edifício, com as mesmas alterações, pode obter mínimos energéticos diferentes se se localizar em regiões diferentes. Para os casos concretos de Lisboa e Fundão, as opções adequadas de alteração dos vãos envidraçados são a utilização de vidro duplo incolor em ambos os casos, diferenciando-se na percentagem de vãos. Em Lisboa, a percentagem ideal é de 20 % e no Fundão de 40 %. Esta diferença poderá dever-se ao contraste das temperaturas exteriores.

Outra alteração estudada foi a aplicação de isolamento térmico na envolvente exterior. O consumo de energia do edifício na sua região real (Fundão) apresenta um comportamento decrescente, começando a estabilizar com o aumento da espessura do isolamento térmico. Porém, se o mesmo edifício se situasse na região de Lisboa, a aplicação de isolamento térmico nunca seria compensatória. Para este caso, qualquer espessura de isolamento seria prejudicial. Salienta-se que estas conclusões são válidas para um edifício de escritórios com elevadas cargas térmicas, não podendo ser extrapoláveis para edifícios cujo comportamento seja dominado pelas necessidades de aquecimento, em detrimento das necessidades de arrefecimento. Conclui-se, portanto, que para a região de Lisboa, a aplicação de isolamento térmico num edifício de escritórios existente, com as características construtivas idênticas às do edifício X, conduz a maiores consumos de energia do que na ausência de isolamento térmico.

Este comportamento deve-se às temperaturas exteriores serem maiores para esta região e, uma vez que os ganhos internos são elevados, há sempre necessidade de perder calor para o exterior. Com a introdução de isolamento térmico, há menores perdas, havendo uma maior concentração de calor no interior do edifício, levando a maiores necessidades de arrefecimento.

Todas as soluções construtivas propostas têm um custo associado. A relação entre o custo global e o comportamento energético permite calcular o custo ótimo. Assim, o custo ótimo para a região de Lisboa, com a alteração do isolamento térmico, não é atingido. Esta situação era previsível dado que as necessidades de energia estão sempre a aumentar. No Fundão, as necessidades de energia para AVAC diminuem com a aplicação de isolamento térmico e, associando essa descida com os custos globais, obtém-se um custo ótimo quando se introduz 2 cm de isolamento pelo exterior. Esta é a melhor opção para a região do Fundão.

A alteração da percentagem de vãos envidraçados e do tipo de vidro utilizado influencia o comportamento energético do edifício. Com estas alterações, alcançou-se o custo ótimo (em Lisboa) com a mudança de vidro simples para vidro duplo incolor em 20 % da fachada. O mesmo caso, mas para o Fundão, tem um custo ótimo com a modificação para vidro simples incolor em 30 % da fachada.

Conclui-se, portanto, que alterações às componentes construtivas influenciam os consumos de energia do edifício e, associadas a essas alterações, tem-se um custo global. O custo ótimo de um mesmo edifício varia de região para região.

Referências

- A.J.Marszal, P. H., A.Napolitano (2011). "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies." Energy and Buildings **43**: 971-979.
- AbuShama, J. and Johaston, S. (2004). "Properties of ZnO/CdS/CuInSe₂ Solar Cells with Improved Performance." Progress in Photovoltaics: Research and Applications **12**: 39-45.
- ADENE (2008). "Perguntas & Respostas sobre o RCCTE."
- ADENE (2008). "Perguntas & Respostas sobre o RSECE."
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Andrade, H., et al. (2006). Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa. Lisboa.
- BPIE (2010). "Cost Optimality - Discussing methodology and challenges within the recast energy performance of buildings directive."
- Buildings Performance Institute Europe (2011). Principles for nearly zero-energy buildings, BPIE.
- CA-EPBD (2011). Implementing the energy performance of buildings directive. Belgium, Brussels.
- Carlos A.Pina dos Santos, L. M. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, LNEC.
- CYPE Ingenieros. "Gerador de preços." from <http://www.geradordeprecos.info/>.
- Decreto-Lei nº79/2006 (2006). "Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios." Diário da República.
- Decreto-Lei nº80/2006 (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Diário da República.
- Despacho n.º 10249/2008 (2008). Diário da República. **2ª série**.
- Edoff, M. (2004). Thin film solar cells based on CIS - Research for production of cheap and efficient solar modules. Suécia, Uppsala University.
- EN 15603 (2008). Energy Performance of buildings- overall energy use and definition of energy ratings.
- EN ISO 13790 (2008). "Energy performance of buildings–Calculation of energy use for space heating and cooling " European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Energias de Portugal. (2012). "EDP." from <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/Pages/tarifasHorarios.aspx>.
- Energy Plus (2012). EnergyPlus Engineering Reference.
- European Comission. (2012). "Eurostat." from <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdpc320&language=en>.
- Europeia, U. (2010). "Directive 2010/30/EU of the European Parliament " Official Journal of the European Union **53**.
- Gonçalves, H. and Camelo, S. (2008). Os Edifícios Bioclimáticos a Integração das Energias Renováveis e os Sistemas Energéticos.
- ISO 13790 (2008). Energy performance of buildings- calculation of energy use for space heating and cooling.
- Kristen Engelund Thomsen, K. B. W. a. E. (2008). "European national strategies to move towards very low energy buildings."
- Kurnitski, J., Vuolle, M. and Saari, A. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia Perdas térmicas lineares:coeficientes de transmissão térmica linear.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia (2010). Solar XXI: Em direcção à energia zero. Lisboa, Helder Gonçalves.
- Ministério da Indústria e Energia "Isolamento de Edifícios." Notícias da energia.
- Moita, F. (2010). Energia Solar Passiva, Argumentum
- Natural Works. (2012, Março 29). from <http://www.natural-works.com>.
- Panão, M., Reis, R. and Gouveia, A. (2012). Existing non-residential large buildings:asset or operational rating? PCEEE 2012.
- Panão, M. O. Simulação térmica de edifícios num contexto urbano: contribuição para a eficiência energética na cidade.

- Panão, M. O. and Gonçalves, H. "Methodological development of seasonal cooling energy needs by introducing ground-cooling systems." LNEG.
- Patxi Hernandez, P. K. (2010). "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings." Energy and Buildings: 815-821.
- Paulo Santos, P. M., Eduardo Maldonado (2010). Implementation of the EPBD in Portugal. Energy Performance of Buildings.
- Reis, R. d. A. (2011). Contributo para método simplificado no âmbito do SCE: grandes edifícios de serviços existentes, Universidade de Lisboa.

Anexo A – Temperaturas do solo para o clima de Lisboa e Fundão

As temperaturas do solo são obtidas a partir da equação A1.

$$T_{solo} = gm \left[\bar{\theta}_{ext} - am \times \Delta\theta_{ext} \times \sin \left(2\pi \frac{(JH - \phi_m)}{8760} \right) \right] \quad (A1)$$

sendo gm e am coeficientes adimensionais, ϕ_m desvio da curvo (valor zero), JH os dias julianos (horas), $\bar{\theta}_{ext}$ a média anual das temperaturas do ar exterior (°C) e $\Delta\theta_{ext}$ amplitude média anual (°C) (Panão and Gonçalves).

A amplitude média anual $\Delta\theta_{ext}$, é dada pela equação A2:

$$\Delta\theta_{ext} = T_{+quente} - T_{+fria} \quad (A2)$$

Nas Tabelas A1 e A2 constam as temperaturas do solo obtidas a partir da equação (A1) para os diferentes meses, nas regiões de Lisboa e Fundão, respetivamente.

Tabela A1 – Temperaturas do solo para os diferentes meses do ano na região de Lisboa

Mês	Temperatura do solo (°C)
Janeiro	15,0
Fevereiro	13,3
Março	12,1
Abril	12,0
Maio	13,0
Junho	14,8
Julho	16,9
Agosto	18,8
Setembro	19,9
Outubro	19,9
Novembro	18,9
Dezembro	17,1

Tabela A2 – Temperaturas do solo para os diferentes meses do ano na região do Fundão

Mês	Temperatura do solo (°C)
Janeiro	11,4
Fevereiro	9,2
Março	7,7
Abril	7,6
Maio	8,9
Junho	11,2
Julho	14,0
Agosto	16,5
Setembro	17,9
Outubro	17,9
Novembro	16,6
Dezembro	14,2

Anexo B – Cálculo para a obtenção do custo ótimo

B1 – Região de Lisboa

B1.1 - Energia primária (kWh m⁻²ano⁻¹)

Tabela B1.1 1- Energia primária consumida com a variação da espessura do isolamento (Lisboa)

Espessura (cm)	2	4	6	8	10	15	20	25	40
Aquecimento (kWh)	3,50	3,05	2,81	2,66	2,56	2,40	2,32	2,26	2,19
Arrefecimento (kWh)	53,89	55,57	56,60	57,30	57,80	58,60	59,08	59,39	59,89

Tabela B1.1 2– Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro simples

Vidro Simples	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	2,89	3,24	3,49	3,73	3,99	4,26	4,60	5,05	5,47	5,93
Arrefecimento (kWh)	36,16	43,24	54,46	66,13	77,54	88,37	98,33	106,02	116,67	123,72
Iluminação (kWh)	78,10	51,09	43,48	40,45	38,68	37,48	36,64	36,16	35,61	35,20

Tabela B1.1 3 - Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro duplo incolor

Vidro Duplo Incolor	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	2,56	2,57	2,53	2,51	2,50	2,50	2,56	2,71	2,85	3,03
Arrefecimento (kWh)	36,53	42,57	53,21	64,91	76,66	88,10	98,88	107,54	119,05	127,06
Iluminação (kWh)	13,08	8,59	7,18	6,64	6,34	6,13	5,99	5,91	5,81	5,74

Tabela B1.1 4 - Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro duplo com baixo fator solar

Vidro Duplo com baixo fator solar	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	2,69	2,94	3,23	3,49	3,72	3,93	4,15	4,40	4,64	4,91
Arrefecimento (kWh)	37,22	39,07	42,55	47,49	53,23	59,24	65,07	70,12	76,92	81,90
Iluminação (kWh)	99,31	77,15	61,62	52,99	48,41	45,84	44,26	43,96	43,13	42,48

B1.2 – Custo anual da energia (€)

Tabela B1.2 1 – Custo anual para as diferentes espessuras de isolamento térmico

e (cm)	0	2	4	6	8	10	15	20	25	40
C _{a,i}	73969,07	82725,12	84500,54	85629,70	86416,56	86991,99	87928,24	88492,87	88867,62	89468,93

Tabela B1.2 2 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro simples

VS	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i} (€)$	233030	168853	140621	146184	158996	173256	187529	201166	212198	227362	237596

Tabela B1.2 3 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro duplo incolor

VD	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i} (€)$	2254239	1684817	1377991	1403032	1518747	1655930	1797577	1936454	2052108	2206184	2314339

Tabela B1.2 4 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro duplo de baixo fator solar

V _{gs}	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i} (€)$	233030	200659	171733	154795	149645	151863	157117	163558	170770	179727	186361

B1.3 – Custos de investimento (€)

Tabela B1.3 1 – Custo de investimento para a colocação de diferentes espessuras de isolamento térmico

e (cm)	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40
$C_i (€)$	0,0	4672,7	6805,0	8930,8	11063,1	13195,4	18526,2	23857,0	29187,8	34518,7	45180,3

Tabela B1.3 2 – Custo de investimento de colocação de vidro simples para diferentes % de vãos envidraçados

VS	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_i (€)$	0,0	2647,2	5294,4	7941,5	10588,7	13235,9	15883,1	18530,2	21177,4	23824,6	26471,8

Tabela B1.3 3 - Custo de investimento de colocação de vidro duplo incolor para diferentes % de vãos envidraçados

VD	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_i (€)$	0,0	3395,4	6790,8	10186,2	13581,6	16977,0	20372,3	23767,7	27163,1	30558,5	33953,9

Tabela B1.3 4 - Custo de investimento de colocação de vidro duplo de baixo fator solar para diferentes % de vãos envidraçados

V _{gs}	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_i (€)$	0	5105,97	10211,9	15317,9	20423,9	25529,8	30635,8	35741,8	40847,8	45953,7	51059,7

B2 – Região do Fundão

B2.1 - Energia primária (kWh m⁻²ano⁻¹)

Tabela B2.1 1 - Energia primária consumida com a variação da espessura do isolamento

Espessura (cm)	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40
Aquecimento (kWh)	21,81	19,75	18,59	17,85	17,33	16,54	16,11	15,83	15,62	15,39
Arrefecimento (kWh)	23,25	24,16	24,74	25,15	25,44	25,92	26,21	26,40	26,53	26,70

Tabela B2.1 2 - Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro simples

Vidro Simples	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	19,52	23,06	25,29	26,90	28,20	29,47	30,79	32,24	33,54	34,89
Arrefecimento (kWh)	17,35	17,89	20,73	24,11	27,46	30,69	33,64	35,94	39,41	41,62
Iluminação (kWh)	88,64	60,46	49,18	44,48	41,90	40,22	39,08	38,61	37,89	37,40

Tabela B2.1 3 - Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro duplo incolor

Vidro Duplo Incolor	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	17,94	19,85	20,82	21,24	21,48	21,73	22,03	22,49	22,85	23,39
Arrefecimento (kWh)	17,82	18,20	20,84	24,29	27,86	31,39	34,74	37,46	41,35	44,11
Iluminação (kWh)	14,63	10,19	8,18	7,34	6,88	6,60	6,40	6,33	6,21	6,12

Tabela B2.1 4 - Energia Primária consumida com a variação da % de vãos envidraçados para o vidro duplo de baixo fator solar

Vidro Duplo Baixo Fator Solar	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aquecimento (kWh)	17,84	19,74	21,75	23,36	24,63	25,69	26,66	27,41	28,20	29,05
Arrefecimento (kWh)	18,42	18,31	18,56	19,53	21,01	22,75	24,51	26,12	28,36	30,02
Iluminação (kWh)	103,30	86,78	71,33	60,92	54,61	50,87	48,50	48,46	47,27	46,43

B2.2 – Custo anual da energia (€)

Tabela B2.2 1 - Custo anual para as diferentes espessuras de isolamento térmico

e (cm)	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40
$C_{a,i}$	73969,07	64938,7	63300,7	62460,5	61968,8	61649,3	61201,1	60997,5	60855,7	60762,4	60670,1

Tabela B2.2 2 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro simples

VS	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i}(\text{€})$	233030	180898	146158	137229	137625	140620	144680	149184	153931	159758	164194

Tabela B2.2 3 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro duplo incolor

VD	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i}(\text{€})$	2087258	1642227	1313244	1197694	1179826	1192262	1218013	1249548	1284709	1329723	1365316

Tabela B2.2 4 - Custo anual para as diferentes % de vãos envidraçados de vidro duplo de baixo fator solar

V _{gs}	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_{a,i}(\text{€})$	2254239	1945792	1740472	1556607	1447504	1397766	1384724	1389622	1422091	1447693	1470930

B2.3 – Custos de investimento (€)

Tabela B2.3 1 - Custo de investimento para a colocação de diferentes espessuras de isolamento térmico

e (cm)	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40
$C_I(\text{€})$	0,00	4672,7	6805,0	8930,8	11063,1	13195,4	18526,2	23857,0	29187,8	34518,7	45180,3

Tabela B2.3 2 - Custo de investimento de colocação de vidro simples para diferentes % de vãos envidraçados

VS	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_I(\text{€})$	0	2647,2	5294,4	7941,5	10588,7	13235,9	15883,1	18530,2	21177,4	23824,6	26471,8

Tabela B2.3 3 - Custo de investimento de colocação de vidro duplo incolor para diferentes % de vãos envidraçados

VD	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_I(\text{€})$	0,0	3395,4	6790,8	10186,2	13581,6	16977,0	20372,3	23767,7	27163,1	30558,5	33953,9

Tabela B2.3 4 - Custo de investimento de colocação de vidro duplo com baixo fator solar para diferentes % de vãos envidraçados

V _{gs}	Real	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$C_I(\text{€})$	0,0	5106,0	10211,9	15317,9	20423,9	25529,9	30635,8	35741,8	40847,8	45953,7	51059,7